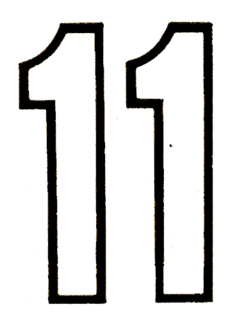


1981

msr

messen · steuern · regeln

System

Kriterium

Modell

Einstellung

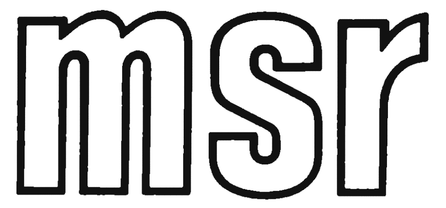
24. Jahrgang
Heft 11
November 1981



Index 32 525
ISSN 0026-0347

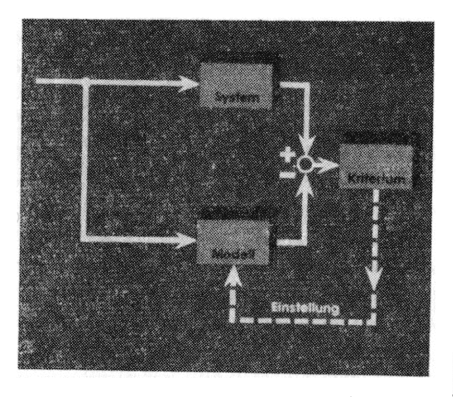
**VEB
Verlag Technik
Berlin**

Verlagspostamt Leipzig
EVP: 4,— M



messen · steuern · regeln

Wissenschaftlich-technische Zeitschrift für die Automatisierungstechnik



Modellbildungsstrategien haben Einzug in nahezu alle volkswirtschaftlichen Gebiete gehalten, da geeignete Modelle die Grundlage für Entscheidungsfindungen sind. In der Regelungstechnik ist das Streckenmodell Voraussetzung für den gezielten Reglerentwurf.
Dem Anliegen der Modellbildung ist ein wesentlicher Teil der 10. Jahrestagung „Grundlagen der Modellierung und Simulation" vom 8. bis 10. Dezember 1981 in Rostock gewidmet. Die Beiträge auf den Seiten 602 bis 629 sind dafür als Tagungsmaterial vorgesehen.

Titelgrafik: *G. Schwesinger*

Herausgeber:

Wissenschaftlich-technische Gesellschaft für Meß- und Automatisierungstechnik (WGMA) in der KDT

11

24. Jahrgang
November 1981

VEB VERLAG TECHNIK

AUFSÄTZE

ISSN 0026-0347

10. Jahrestagung „Grundlagen der Modellierung und Simulation" des Fachausschusses Modellierung der WGMA

Die 10. Jahrestagung fällt in die Zeit des 15jährigen Bestehens des Fachausschusses Modellierung. Die Entwicklung des Fachausschusses als Motor und Organisator der Simulationstechnik und der ihr vor- bzw. nachgelagerten Phasen für die Systemanalyse und Modellierung bzw. Steuerungstheorie und Entscheidungstheorie begann mit der Entwicklung der Analogrechentechnik und verkörpert somit auch ein Stück Geschichte unseres Fachgebietes in der DDR. Seit der Einführung der Jahrestagung „Grundlagen der Modellierung und Simulation" zeigt das Programm der Veranstaltung auch die Entwicklungsfortschritte. Wichtige Stationen dieser Entwicklung waren zunächst die technischen Grundlagen der Simulation:

- *Analogrechentechnik (einschließlich iterativer Analogrechner mit zusätzlichen Logikbausteinen) um 1965*
- *Digitalrechentechnik (Software für die Simulation von allgemeineren Systemklassen) um 1970*
- *Hybridrechentechnik (Soft- und Hardware) um 1970*

Die Phasen waren verbunden mit der Initiierung, Pilotanwendung, Standardisierung und Verbreiterung dieser Techniken im Rahmen von Anwenderschulungen. In diesen Phasen entwickelten sich die Fachunterausschüsse Hybridrechentechnik, Digitale Simulation, Standardisierung und Theoretische Grundlagen der Modellierung.

In der Folgezeit waren Schwerpunkte der Arbeit:

- *Systemanalyse und mathematische Modellbildung (Strategien für die Modellierung)*
- *Modellierung in der Verfahrenstechnik*
- *Modellierung in der Biologie*
- *Modellierung im Verkehrswesen*
- *Modellierung im Energiewesen.*

Obwohl die Simulationstechnik nunmehr — und nicht zuletzt durch das Wirken des Fachausschusses — zu den täglichen Hilfsmitteln in der Forschung und Entwicklungsarbeit gehört, stehen wichtige Aufgaben noch bevor. Diese Aufgaben werden gestellt durch die Möglichkeiten der Klein- und Mikrorechentechnik für die Simulation, durch die Notwendigkeit, große komplexe Systeme modellmäßig zu beschreiben sowie durch die Erfordernisse, die Steuerungs- und Entscheidungstheorie auch stärker auf größere nichttechnische Systeme und Prozesse anzuwenden, z. B. auf komplexe Produktionsprozesse oder Entwurfsprozesse. Diese hierdurch skizzierten künftigen Entwicklungslinien der Forschungen auf den Gebieten der Systemanalyse, Modellierung und Simulation werden als Beitrag der disziplinären Entwicklung der Wissenschaftszweige selbst, aber auch als Beitrag zur Erfüllung der ökonomischen Strategie der 80er Jahre in der DDR aufgefaßt.

Die Tatsache, daß in zunehmendem Maße Teilnehmer der RGW-Staaten an unserer Tagung beteiligt sind, zeigt die allgemeine wissenschaftliche und internationale ökonomische Bedeutung des Arbeitsprogrammes.

Wir hoffen, daß die 10. Tagung die Tradition der Tagungsreihe erfolgreich fortsetzt.

msr 7483 Prof. Dr. rer. nat. *A. Sydow*, Vorsitzender des Fachausschusses Modellierung der WGMA,
Dr.-Ing. *H.-J. Bartsch*, Tagungsbeauftragter des Fachausschusses.

Prof. Dr. rer. nat. habil. *M. Peschel* und Dipl.-Math. *W. Mende*, Berlin[1])

Probleme der mathematischen Modellierung von Evolutionsprozessen

IA 1.1.

0. Einleitung

Viele Jahrhunderte lang hatte die Menschheit an eine Welt geglaubt, die im wesentlichen eingerichtet ist. Erst mit *Darwin, Heckel, Marx* wurde von einer Welt der prästabilisierten Harmonie Abstand genommen und an einer überwältigenden Fülle von Faktenmaterial überzeugend nachgewiesen, daß zumindest das organische Leben sich in einem kontinuierlichen Entwicklungsprozeß befindet. Inzwischen wissen wir, daß dies auch für die gesamte anorganische Welt gilt, die uns umgibt. Damit war die Behauptung „alles bewegt sich, alles fließt" von *Demokrit* wieder mit neuem Inhalt erfüllt.

An der Richtigkeit der Entwicklungslehre zweifelt heute kaum noch jemand, heute geht es vielmehr darum, das „Wie" besser zu verstehen.

In der angewandten Systemanalyse werden komplexe sozioökonomische Systeme, wie die Volkswirtschaft eines Landes, seine Agrarwirtschaft, Wasserwirtschaft, Energiewirtschaft, komplexe technische Systeme, untersucht, um das Verhalten solcher Systeme besser zu verstehen und objektivierte Grundlagen für Entscheidungen für solche Systeme zu haben.

Dabei geht es darum, daß Entscheidungen, die heute getroffen werden, von nachhaltigem Einfluß sind. Daher bedarf es einer wissenschaftlichen Vorausschau der natürlichen Entwicklungsprozesse in komplexen sozioökonomischen Systemen, um die Entscheidungen der Gegenwart begründet und angepaßt an natürliche Entwicklungstrends treffen zu können.

Vielfach ist noch die falsche Meinung verbreitet, daß „natürliches" Wachstum gleichbedeutend sei mit exponentiellem Wachstum, bei dem die Wachstumsgeschwindigkeit dem je-

---

[1]) Vortrag anläßlich der 10. Jahrestagung „Grundlagen der Modellierung und Simulation" (8. bis 10. Dezember 1981) in Rostock.
Mitteilung aus der Akademie der Wissenschaften der DDR, Forschungsbereich Mathematik/Kybernetik, und Institut für Geographie und Geoökologie.

weiligen Zustand proportional ist:

$$dx/dt = Kx \searrow x = x(0)\, e^{Kt}\,.$$

Daher heißt vielfach die Exponentialfunktion Funktion des natürlichen Wachstums. Aus diesem Grunde spricht man häufig auch in der Makroökonomie von gleichmäßig proportionaler Entwicklung. Leider tritt in Wirklichkeit exponentielles Wachstum fast nie auf, nur isolierte Systeme zeigen exponentielles Wachstum, z. B. tritt es auf bei der Zellteilung. In der Realität treffen wir vor allem gekoppelte Prozesse an, vielfach treten kooperative Wechselwirkungen auf. Je höher die Kooperativität ist, umso stärkere Abweichungen vom exponentiellen Wachstum werden beobachtet.

Wir haben zwischen stetiger und diskontinuierlicher Evolution zu unterscheiden. In einer Phase der stetigen Evolution vollzieht ein Wachstumsindikator einen s-förmigen Übergang von einem stationären Zustand zum nächsten, wie schematisch im Bild 1 dargestellt.

Eine Phase der stetigen Evolution (genannt „Evolon") wird abgelöst durch eine Phase möglicher diskontinuierlicher Veränderung (Änderung der Qualität, Bifurkation, Entstehung neuer Arten usw.). Natürlich bereitet sich die Phase der qualitativen Veränderungen in der Phase der stetigen Evolution vor, quantitiative allmähliche Anhäufung führt letztendlich zu einem qualitativen Sprung.

In diesem Beitrag werden nur die Probleme im Zusammenhang mit der stetigen Evolution dargestellt, die Arbeiten zu diskontinuierlichen Strukturbildungsphänomenen werden in einem eigenständigen Artikel vorgestellt.

In der Aufschwungphase eines Evolons kommt es zum Aufbau kooperativer Bindungen bestimmter Intensität, diese bewirken sog. autokatalytische Effekte und manifestieren sich in den Wachstumsindikatoren durch gleichmäßig überproportionales Wachstum, das häufig durch ein hyperbolisches Wachstumsgesetz gekennzeichnet ist

$$dx/dt = Kx^k \quad \text{mit} \quad k > 1\,.$$

In der Sättigungsphase lösen sich viele Bindungen und äußere Begrenzungen übernehmen eine dominierende Rolle, so daß nicht einmal mehr exponentielles Wachstum möglich ist, wir treffen dann in den meisten Fällen parabolische Dämpfungsprozesse an, d. h. gleichmäßig unterproportionales Wachstum mit

$$dx/dt = K(b - x)^l \quad \text{mit} \quad l < 1\,.$$

Der gesamte s-förmige Übergang eines Evolons ist die Einheit dieser beiden gegensätzlichen Bewegungsformen und läßt sich in geschlossener Form durch ein sog. Potenzprodukt-Triebkraftgesetz beschreiben:

$$dx/dt = Kx^k(b - x)^l\,.$$

Kooperative Effekte sind häufig durch eine strukturbedingte Wechselwirkung bedingt, dabei treten besonders oft Kettenstrukturen oder sogenannte Kaskaden auf. Ein Mastersystem mit der Zustandsgröße x_{i+1} gibt proportional zu x_{i+1} eine Ressource (stofflich, energetisch) an das ihm nächstuntergeordnete System mit der Zustandsgröße x_i ab, wobei sich proportional zu x_{i+1} dessen Wachstumsrate $dx_i/dt : x_i$ verändert. Darüber hinaus kann ein proportionaler Abfall in beiden Systemen auftreten.

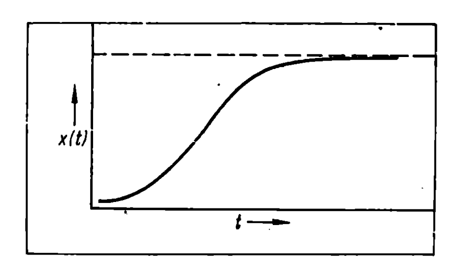


Bild 1
Schematische Darstellung eines Evolons

Beispiele für solche Kettenwechselwirkungen sind die sog. Nahrungsketten (Urwald, Ozean), die Energiekette Sonne, Biosphäre, Mensch, Mikroorganismen. Für jedes Glied einer solchen Kette haben wir also im einfachsten Falle folgende Bilanz:

$$dx_i/dt = K_i x_i x_{i+1} - L_i x_i x_{i-1} - a_i x_i; \qquad i = 0, 1, \dots, N\,.$$

Es sind $L_0 = 0$ und $K_N = 0$.

Bestehen zwischen den Gliedern einer solchen Kette beträchtliche Unterschiede in den Reservoirinhalten und kann man auch den Abfall vernachlässigen, so gelangt man zu dem idealisierten, aber besonders wichtigen Spezialfall der Exponentialketten

$$dx_i/dt = K_i x_i x_{i-1}; \qquad i = 0, 1, 2, \dots, N\,.$$

Diese stellen einen Schlüssel zum tieferen Eindringen in beliebige stetige Wachstumsprozesse dar, so wie die Schieberegister- oder Zählketten einen Schlüssel für die dynamischen Eigenschaften der diskontinuierlichen Automaten darstellen. Dieser Schlüssel erweist sich zugleich als ein brauchbares Werkzeug für den Strukturentwurf instationärer und nichtlinearer Prozesse [6].

1. Entwurf der Struktur von Wachstumsprozessen mit Hilfe von Exponentialketten

Der Wachstumsprozeß wird aufgefaßt als ein Netz verkoppelter elementarer Systeme, in dem Exponentialketten eine dominierende Rolle spielen, d. h., man sucht eine Strukturrealisierung mit möglichst wenig möglichst langen Exponentialketten (ähnliche Forderung wie bei der Schiebekettenstruktur binärer Automaten).

Betrachten wir zunächst eine isolierte Exponentialkette

$$dx_i/dt = K_i x_i x_{i+1}\,.$$

Um die Möglichkeit einer eindeutigen Koeffizientenbestimmung bei gegebenem Signal $x(t) = x_0(t)$ zu erhalten, fordern wir die Zustandsnormierung $x_i(0) = 1$. Dann ergeben sich die Koeffizienten zu:

$$K_i = \left.\frac{d \ln x_i}{dt}\right|_{t=0},$$

und die Zustandsgrößen x_i aufeinanderfolgender Stufen erhält man aus der Rekursion

$$x_i(t) = \frac{1}{K_{i-1}} \frac{d \ln x_{i-1}}{dt}$$

Dies ist ein *neues* Signalentwicklungsprinzip, völlig gleichberechtigt zur wohlbekannten Taylorreihenentwicklung.

Bei der Taylorreihenentwicklung liegt die gleiche Kettenstruktur vor, nur haben die Knoten die Gleichungen

$$dx_i/dt = x_{i+1} + K_i \quad \text{mit der Normierung} \quad x_i(0) = 0\,.$$

Wir haben es mit einer endlichen Exponentialkette genau dann zu tun, wenn gilt: $x_N(t) = 1$ bzw. $K_N = 0$; wir nennen es ein Exponentialpolynom.

Wir stellen nun wichtige Spezialfälle von Exponentialketten vor:

Es sei $K_i \to K$ eine konvergente Folge von Parametern einer Exponentialkette für $N \to \infty$. Ist $K = 0$, so kann die Kette faktisch durch ein Exponentialpolynom ersetzt werden, für $K \neq 0$ geht ein Exponentialpolynom immer mehr über in einen abschließenden Turm, wo alle Glieder den gleichen Parameter K haben.

Ein Exponentialturm mit $K_i = K$ konvergiert gleichmäßig gegen ein hyperbolisches Wachstumsgesetz $x(t) = 1/(1 - Kt)$. Daraus ergibt sich der wichtige Schluß: Ratengekoppelte exponentiell wachsende Systeme bilden eine Kettenstruktur, die hyperbolisches Wachstum zeigt. Eine Exponentialkette mit periodischer Parameterfolge und der Grundperiode $K_0, K_1, \dots,$

K_{r-1} konvergiert mit wachsender Länge der Kette gegen ein Verhalten, das Lösung einer nichtlinearen Fixpunktgleichung der Form $F^r x = x$ mit dem nichtlinearen Operator.

$$F = \frac{\mathrm{d}\ln}{\mathrm{d}t} \bigg/ \frac{\mathrm{d}\ln}{\mathrm{d}t} \bigg|_{t=0}$$

(normierte logarithmische Ableitung) ist.

Dies ist ähnlich zum bekannten Hyperzyklusgesetz von *Eigen/Schuster* [2]. Wichtig für das Verständnis des dynamischen Verhaltens von Exponentialketten sind noch folgende Feststellungen:

a) $K_i > 0$ liefert ein treibendes Glied, das Wachstum bei den untergeordneten Systemen stimuliert, $K_i < 0$ bestimmt ein dämpfendes Glied.

b) Beim Vorliegen eines dämpfenden Gliedes $K_i < 0$ entsteht eine monoton fallende Zustandsgröße $x_i(t)$. Konvergiert $x_i(t)$ gegen eine von Null verschiedene Konstante, so zerreißt die Kette an dieser Stelle und das nächstuntergeordnete Glied wird dominierend in der unteren abgetrennten Kette, das Glied x_i geht verloren. Konvergiert $x_i(t)$ sogar gegen Null, so geht offenbar auch das Glied x_{i-1} verloren.

Bild 2 zeigt durch Fallunterscheidung verschiedene Verhaltensmoden einer zweistufigen Kettenstruktur, aus ihm geht die dominierende Rolle hyperbolischen Wachstums hervor.

Bild 3 zeigt die Fallunterscheidung in verschiedene Verhaltensmoden eines Hyperzyklus der Ordnung 2.

Nun wollen wir die Exponentialkettenstruktur zur Grundlage des Strukturentwurfs einer breiten Vielfalt instationärer und nichtlinearer Prozesse machen. Wir beschreiben die Strukturentwurfsregeln für den Fall, daß eine Struktur aus verkoppelten Exponentialketten gesucht ist für ein analytisch gegebenes Signal $x(t) = x_0(t)$. Die Vorgehensweise bei implizit gegebenen Signalen, etwa durch beschreibende Differentialgleichungen, ist dazu völlig analog.

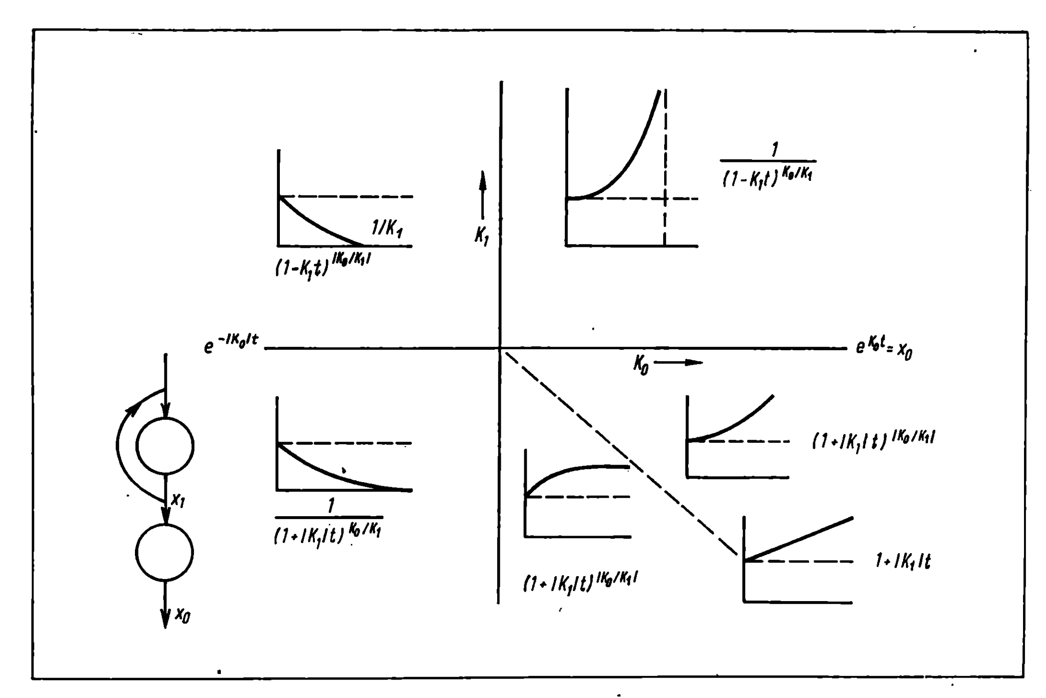


Bild 2
Verhaltensstrukturen einer speziellen Struktur

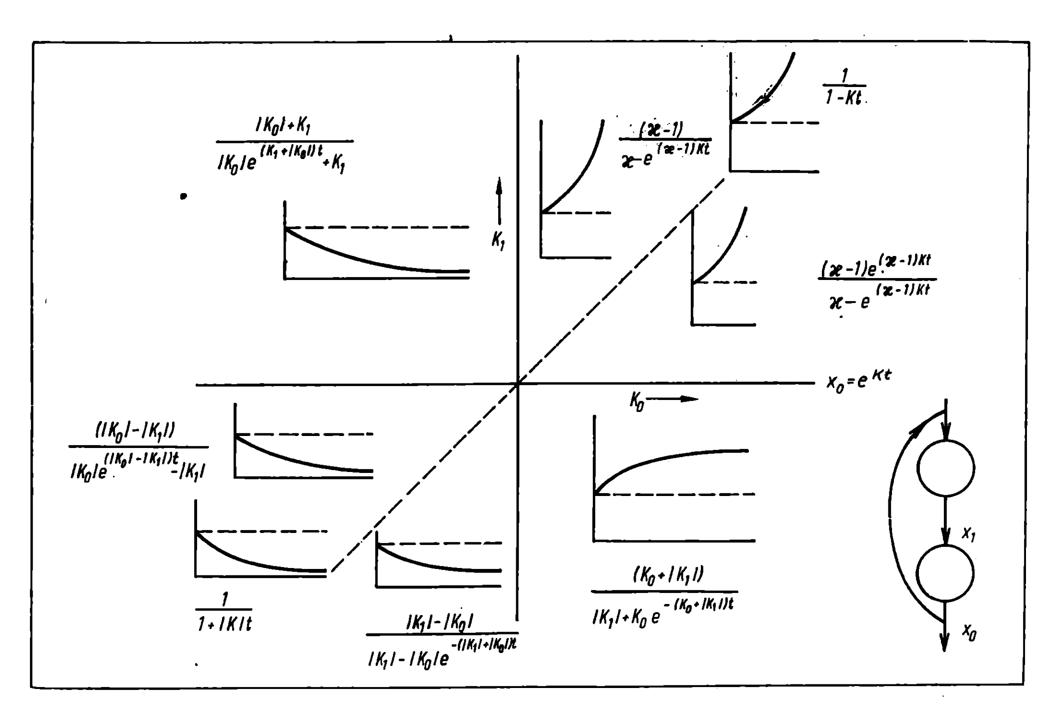


Bild 3
Verhaltensstrukturen eines Hyperzyklus 2. Ordnung

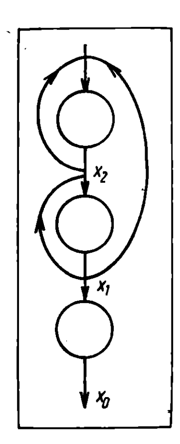


Bild 4
Struktur eines Systems mit Potenzprodukttriebkraft

Entwurfsregeln

1) Wir wenden auf $x(t) = x_0(t)$ aufeinanderfolgend den Grundoperator $F = \frac{d}{dt} \ln$ an, um rekursiv die Zustandsgrößen $x_i(t)$ zu erzeugen. Angestrebt wird dabei eine Kette $x_{i+1}(t) \sim Fx_i(t)$. Dabei bedeutet $\sim$ Gleichheit bis auf multiplikative Konstanten. Es passiert jedoch, daß die Anwendung $Fx_i(t)$ zu einem arithmetischen Ausdruck A_i führt, mit dem nach Regel 2) weiter zu verfahren ist.

2) Erkennt man in A_i schon bekannte Signale, so markiert man diese. Sie führen entweder zu Kopplungen zu schon in der Schaltung enthaltenen Signalen oder zur Substitution aus einer Sammlung vorgefertigter Strukturen. Konstanten als Strukturparameter werden nicht notiert, wenn es um die Bestimmung des Strukturgraphen geht.
Für alle unbekannten Signale des Ausdrucks A_i werden Namen eingeführt, und diese neuen Signale werden wie $x_0(t)$ gemäß Regel 1) behandelt.

3) Der Strukturentwurf ist abgeschlossen, wenn bei Regel 2) keine neuen Signale mehr auftreten.

2. Beispiele für wichtige Triebkraftfunktionen von Wachstumsprozessen

2.1. *Potenzprodukttriebkräfte* [3]

Für die Beschreibung eines Evolons wird folgendes Modell gewählt:

$$dx/dt = Kx^k(b - x^w)^l .$$

Das k ist Maß für die Komplexität des kooperativen Wachstumsprozesses, l ist Maß für die Kopplungskomplexität zur Umgebung, w ist ein Reichweitenparameter. Bild 4 zeigt die nach der Entwurfsmethode erhaltene Struktur. Bemerkenswerterweise besteht sie aus einem Volterra-Lotka-System 2. Ordnung, das einen einfachen Exponentialintegrator treibt.
Wichtige Spezialfälle dieser Triebkraftfunktion haben schon bisher in der Wachstumsdynamik eine Rolle gespielt, z. B.: $dx/dt = b - y^w$ allometrische Sättigung, $dx/dt = Kx(b - x)$ logistische Sättigung, $dx/dt = x^k(1 - x^{1-k})$ Bertalanffy-Funktion, $dx/dt = x^{1-w}(1 - x^{1-w})$ Schraubersche Funktion, $dx/dt = x(-\ln x)$ Gompertz-Funktion, $dx/dt = x(-\ln x)^{1/2}$ ökologische Funktion, $dx/dt = x(-\ln x)^l$ verallgemeinerte ökologische Funktion, $dx/dt = x^k/(1 - x)^l$ unvollständige β-Funktion.
Aus dem allgemeinen Ansatz ergeben sich für kleines w und $K = \varkappa/w$ die Triebkräfte, welche $\ln x$ enthalten.
Wichtig ist die Frage, welche weiteren Triebkraftfunktionstypen zur gleichen im Bild 4 dargestellten Struktur gehören, also einem Differentialgleichungssystem der folgenden Form genügen:

$$dx_0/dt = K_0x_0x_1; \qquad dx_1/dt = x_1(K_1x_1 + L_1x_2);$$
$$dx_2/dt = x_2(K_2x_2 + L_2x_1) .$$

Bemerkenswerterweise läßt sich diese Frage vollständig beantworten, und zwar erhalten wir die folgenden Wachstumstypen:

$$dx/dt = Kx^k(B + Ax^w)^l$$
$$dx/dt = Kx^k(B + A \ln x)^l$$
$$dx/dt = Kx^k e^{w \cdot x^l}$$

2.2. *Triebkraftfunktion vom Pearsontyp I*

Pearson hat schon im 19. Jahrhundert im Zusammenhang mit Wachstumsfragen versucht, sehr unterschiedliche Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen $\varphi(t)$ zu systematisieren und hatte bemerkt, daß sie fast alle einer Differentialgleichung folgender Art genügen (worin t die Zufallsvariable bedeutet):

$$d\varphi/dt = \varphi(t - a_0)/(b_0 + b_1t + b_2t^2) .$$

Dies ausnutzend definieren wir die Wachstumsdynamik vom Pearsontyp I in der Form

$$dx_0/dt = \varphi(t); \qquad d\varphi/dt = \varphi(t - a_0)/(b_0 + b_1t + b_2t^2) .$$

Dazu gehört nach unserer Entwurfsmethodik die im Bild 5 dargestellte Struktur. Betrachten wir diese Struktur als ein produktives Werkzeug, um außer der Ausgangswachstumsdynamik vom Pearsontyp I weitere Wachstumsdynamiken zu erzeugen, die durch die gleiche Struktur gegeben sind, so erhalten wir folgendes allgemeine Resultat

$$dx_0/dt = \varphi(t); \qquad d\,\varphi/dt = \varphi(a + bt)^r\,(C + (A + Bt)^w)^l .$$

2.3. *Triebkraftfunktion vom Pearsontyp II*

Wir nutzen nun die Pearson-Differentialgleichung in anderer Weise zur Definition einer Wachstumsdynamik aus, indem wir fordern;

$$dx_0/dt = \varphi(x); \qquad d\varphi/dx = \varphi(x - a_0)/(b_0 + b_1x + b_2x^2) .$$

Bild 6 zeigt die nach den Entwurfsregeln erhaltene Struktur. Es ist offenkundig, daß sie eine Erweiterung der Struktur im Bild 5 ist.

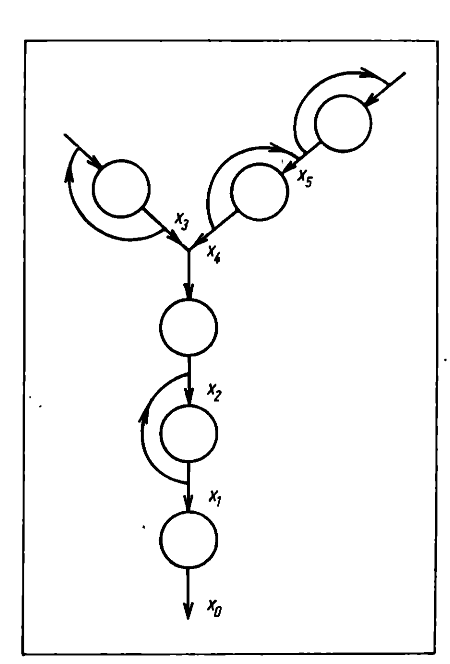


Bild 5
Struktur eines Systems vom Pearsontyp I

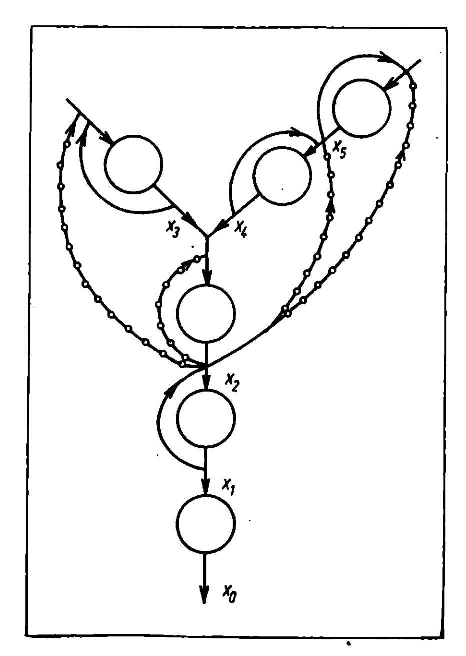


Bild 6
Struktur eines Systems vom Pearsontyp II

Folgende unter Abschn. 2.1. konstruierte Wachstumstypen sind Spezialfälle von Pearson II: $dx/dt = Kx^k(B + Ax)^l$, $dx/dt = Kx^k e^{w \cdot x}$.

Die Frage nach allen diese Struktur erfüllenden Wachstumstypen läßt sich in analytisch geschlossener Form nicht beantworten, klar ist jedoch, daß diese Struktur auch erfüllt wird von

$$dx_0/dt = \varphi(x); \qquad d\varphi/dt = \varphi(a + bx)^r \,(C + (A + Bx)^w)^l \,.$$

Bemerkenswerterweise werden also gegebene Signale oder Differentialgleichungen über den dargestellten Strukturentwurf eingebettet in ein System von Differentialgleichungen 1. Ordnung, die bilinear in den rechten Seiten sind; dabei ist die Gesamtordnung der Struktur immer höher als die Ordnung der eingebetteten Differentialgleichung.

Die Strukturparameter gehen linear ein, was zu dem Gedanken verführen könnte, daß über diese Strukturbeschreibung eine einfachere Identifikation der in der Ursprungsdifferentialgleichung häufig nichtlinear enthaltenen Parameter möglich sei. Leider scheint dies allerdings nicht viel zu helfen, weil man bei der Identifikation nicht davon ausgehen kann, daß die Größen $x_1(t)$ gemessen werden können, sondern nur die Größe $x_0(t)$.

Mit dem hier beschriebenen Strukturentwurf läßt sich die Wachstumsdynamik, die sich auf gewöhnliche nichtlineare Differentialgleichungen stützt, sehr gut systematisieren.

Wichtig ist auch die Feststellung, daß immer Strukturen entstehen, in denen die Multiplikationsoperation zwischen Signalen im Gegensatz zur üblichen Analogrechentechnik nicht mehr vorkommt, jedoch ist der Grundmodul Integrator dabei durch den Grundmodul Exponentialintegrator $I = e^{\int_0^t}$ zu ersetzen.

Literatur

[1] *Peschel, M.; Wunsch, G.:* Methoden und Prinzipien der Systemtheorie. Berlin: VEB Verlag Technik 1972.

[2] *Eigen, M.; Schuster, P.:* The Hypercycle. Westberlin/Heidelberg/New York: Springer-Verlag 1979.

[3] *Mende, W.; Peschel, M.:* Problems of Fuzzy Modelling, Control and Forecasting of Time-Series and some Aspects of Evolution. IFAC-Symposium on Control Mechanisms in Bio- and Ecosystems. Leipzig 1977. Plenary Paper.

[4] *Peschel, M.; Mende, W.; Voigt, M.:* Anwendung der Polyoptimierung auf Evolutionsprozesse. Österreichische Studiengesellschaft für Kybernetik: Rep. No. 16.

[5] *Peschel, M.; Mende, W.; Ahlberendt, N.; Voigt, M.; Grote, U.:* Dynamic Problems of Evolution. IIASA Working Paper SDS, Jan. 1980.

[6] *Mende, W.; Peschel, M.:* Strukturentwurf für instationäre und nichtlineare Systeme. msr 24 (1981) H. 10, S. 581–583.

msr 7486

Dr. rer. nat. *H.-D. Gerhardt*, Berlin[1])

Kombi-Netze und mathematische Modellbildung

IA 1.1

0. Einleitung

Sollen von einem Originalsystem kontinuierliche mathematische Modelle bzw. diskrete mathematische Modelle aufgestellt werden, so stehen eine Reihe von Möglichkeiten zur Verfügung, das mathematische Modell in einer mehr oder weniger übersichtlichen Art und Weise zu formulieren (z. B. Blockdiagramme für kontinuierliche Systeme, Modellbeschreibung mit GPSS für eine große Klasse diskreter Systeme). Mit der Entwicklung und Nutzung kombinierter Simulationssysteme entstand die Aufgabe, Mittel zur Darstellung kombinierter mathematischer Modelle zu finden und dabei die grundverschiedenen Vorgehensweisen bei der Entwicklung diskreter bzw. kontinuierlicher Modelle auf einer übergeordneten Abstraktionsebene zu vereinen, ohne dabei die praktische Anwendungsmöglichkeit aus dem Gesichtsfeld zu verlieren.

Durch die zielgerichtete Erweiterung von Petri-Netzen zu Kombi-Netzen ist es gelungen, in einer einheitlichen Art und Weise diskrete, kontinuierliche und kombinierte mathematische Modelle als Kombi-Netze darstellen zu können. Dabei wurde einerseits davon ausgegangen, daß bei der Modellentwicklung der Aspekt der Modellverwendung als Grundlage von Simulationsmodellen gebührend zu berücksichtigen ist, andererseits auch der Erkenntnis von der Unabhängigkeit zwischen mathematischem Modell und Rechnerprogramm Rechnung getragen.

Im Beitrag wird eine Einführung in Kombi-Netze gegeben. Daran anknüpfend soll der Vortrag schwerpunktmäßig die Anwendung von Kombi-Netzen zur Aufstellung eines auf die Simulation mittels Rechner zugeschnittenen mathematischen Modells, dargestellt als ein schrittweiser Entwurfsprozeß, behandeln.

---

[1]) Vortrag anläßlich der 10. Jahrestagung „Grundlagen der Modellierung und Simulation" (8. bis 10. Dezember 1981) in Rostock.
Mitteilung aus der Humboldt-Universität zu Berlin, Sektion Mathematik.

1. Grundlagen

In kombinierten Modellen können modellbeschreibende Größen auftreten, die sich kontinuierlich oder diskret oder zeitweise kontinuierlich und zeitweise diskret ändern. Davon ausgehend soll eine von bisher betrachteten Zeitmengen abweichende Zeitmenge eingeführt werden. Für ihre „Anzeige" werden zwei Uhren U 1 und U 2 benötigt. U 1 hat als Zeitbasis $\boldsymbol{T1} = \boldsymbol{R}$ (Menge der reellen Zahlen), U 2 hat als Zeitbasis $\boldsymbol{T2} = \boldsymbol{N}$ (Menge der nichtnegativen ganzen Zahlen). In Aktion ist entweder U 1 oder U 2. Bleibt U 1 zum Zeitpunkt $t_1 \in \boldsymbol{T}_1$ „stehen", d. h. eine kontinuierliche oder diskrete Aktivität [6] wird durch Eintreten eines Ereignisses [6] unterbrochen oder beendet, beginnt U 2 von 0 an zu „gehen". Bleibt U 2 stehen, d. h. zum Zeitpunkt t_1 sind keine weiteren Ereignisse mehr möglich, beginnt U 1 vom Zeitpunkt t_1 an „weiterzulaufen", während U 2 wieder auf Null „zurückgestellt" wird. Ausführlich wird die Zeitmenge time mit der Zeitbasis $\boldsymbol{T} \times \boldsymbol{N}$ in [6] behandelt. (t, i) ist ein Zeitpunkt dieser Zeitmenge. Soll nur auf die erste bzw. zweite Komponente Bezug genommen werden, wird von $\boldsymbol{T}$-Zeitpunkt/$\boldsymbol{T}$-Zeit bzw. $\boldsymbol{N}$-Zeitpunkt/$\boldsymbol{N}$-Zeit gesprochen.

Eine Attributvariable kann in einem Beobachtungsintervall $[(t', 0), (t'', i'')]$ konstant, stetig, diskret und gemischt stetig-diskret sein [6].

Das Verständnis von Kombi-Netzen wird erleichtert, wenn man bereits in Grundzügen mit Petri-Netzen vertraut ist. Definition und Aussagen zu Petri-Netzen findet man z. B. in [4] [6] und [9] bis [11]. Zusammengefaßt kann ein Petri-Netz als ein Graph aufgefaßt werden, in dem zwei Arten von Knoten — als Transitionen und Plätze bezeichnet — vorkommen. Gerichtete Kanten, die in einem Platz beginnen, enden in einer Transition, umgekehrt enden alle in einer Transition beginnenden Kanten in einem Platz. Sind bestimmte Voraussetzungen erfüllt, wird eine Transition aktiviert und kann gegebenenfalls schalten. Durch das Schalten werden Marken von den Eingangsplätzen der Transition zu den Ausgangsplätzen bewegt.

2. Zum Aufbau von Kombi-Netzen

Ein Kombi-Netz KN setzt sich aus einem graphischen Teil GT zur überwiegend strukturellen Beschreibung eines Originalsystems und einem beschreibenden Teil BT zur Beschreibung des Verhaltens einzelner als Kombi-Netzelemente dargestellter Teiloriginalsysteme bzw. -elemente zusammen.

Das zum grafischen Teil GT von KN gehörende Tripel **NN** = = (**PL**, **TR**, **CR**) muß ein Netz [11] sein. Mit **PL** ist die Menge der Plätze eines Kombi-Netzes KN bezeichnet, **TR** ist die Menge der Transitionen und $\mathbf{CR} \subseteq (\mathbf{TR} \times \mathbf{PL}) \cup (\mathbf{PL} \times \mathbf{TR})$ die Menge der Kanten. Plätze können markiert sein, die Abbildung mak: $\boldsymbol{I}\,\boldsymbol{T} \times \boldsymbol{N} \rightarrow (\boldsymbol{N}')^{\mathbf{PL}}$ ist so definiert, daß mak (t, i) gerade die Markierung der Plätze von KN zum Zeitpunkt (t, i) ist. ($\boldsymbol{N}'$ = $= \boldsymbol{N} \cup \{d\}$, gilt mak (t, i) $(pl) = d$, dann heißt $pl \in$ **PL** dauermarkiert). Die Menge der Plätze **PL** eines Kombi-Netzes setzt sich aus den Teilmengen

PLE — Menge der E(lementar)-Plätze (pl 1 ∈ **PLE**),
PLD — Menge der D(auer)-Plätze (pl 2 ∈ **PLD**),
PLH — Menge der H(ybrid)-Plätze (pl 3 ∈ **PLH**),
PLK — Menge der K(omplex)-Plätze (pl 4 ∈ **PLK**) zusammen.

Plätze können entsprechend den Angaben der Tafel markiert, dauermarkiert oder nicht markiert sein.

Tafel. Markierung von Plätzen

	PLE	PLD	PLH	PLK
nicht markiert	×	×	×	×
markiert	×	—	×	×
dauermarkiert	—	×	×	×

PLEL, PLEM, PLEP und **PLEN** sind Teilmengen von **PLE**.

Im Bild 1 ist pl 5 ∈ **PLEL**, pl 6 ∈ **PLEM**, pl 7 ∈ **PLEP** und pl 8 ∈ ∈ **PLEN**. Gilt für einen Platz pl ∈ **PL**, daß pl ∈ **PLEM** ∪ **PLEN** ist, dann wurden pl Attributvariable zugeordnet. Die Werte der Attributvariablen von pl können durch ein Schalten der zu pl gehörenden Eingangs- oder Ausgangstransitionen verändert werden.

Gilt pl ∈ **PLEP** ∪ **PLEN**, dann ist pl ein Platz mit Platzverweilzeit.

Unter Platzverweilzeit wird die $\boldsymbol{T}$-Zeit verstanden, die eine auf einem solchen Platz geschaltete Marke mindestens warten muß, ehe sie weiterbewegt werden darf. Im BT ist anzugeben, wie die Platzverweilzeit für jede ankommende Marke zu berechnen ist, z. B.

p 17. pvz : =randint (12, 39, u 1) .

Ein Platz pl ∈ **PLE**, ohne Attributvariable und ohne Platzverweilzeit, gehört zur Menge **PLEL**.

Ein Platz pl ∈ **PLD** darf nur Ausgnagsplatz einer Transition sein, kann aber Eingangsplatz für mehrere Transitionen sein. Obwohl pl nicht mehrfach dauermarkiert sein kann, treten keine Konfliktfälle auf, durch eine dauergeschaltete Ausgangstransition von pl wird nämlich die Dauermarkierung von pl nicht verändert. Es kann eine maximale Anzahl von Ausgangstransitionen für jeden Platz pl ∈ **PLD** festgelegt werden. Ein Platz pl ∈ **PLH** darf ebenfalls nur Ausgangsplatz einer Transition sein. Er kann nicht markiert, markiert mit einer Marke (d. h. mak (t, i) $(pl) = 1$) oder dauermarkiert sein.

Die Menge der Transition **TR** eines Kombi-Netzes setzt sich aus den Teilmengen

TRE — Menge der E(lementar) — Transitionen (tr 1 ∈ **TRE**),
TRU — Menge der U(nterbrechungs) — Transitionen (tr 2 ∈ **TRU**),
TRD — Menge der D(auer) — Transitionen (tr 3 ∈ **TRD**),
TRM — Menge der M(akro) — Transitionen (tr 4 ∈ **TRM**),
TRK — Menge der K(omplex) — Transitionen (tr 5 ∈ **TRK**) zusammen.

Jeder Transition kann im BT ein logischer Ausdruck zugeordnet sein. Eine Transition kann nur aktiviert werden und schalten, wenn dieser logische Ausdruck den Wert true hat. Jede Transition kann eine E/A-Transition sein. Diese Transitionen (z. B. tr 6) besitzen zwei ausgezeichnete Eingangsplätze deren, Markie-

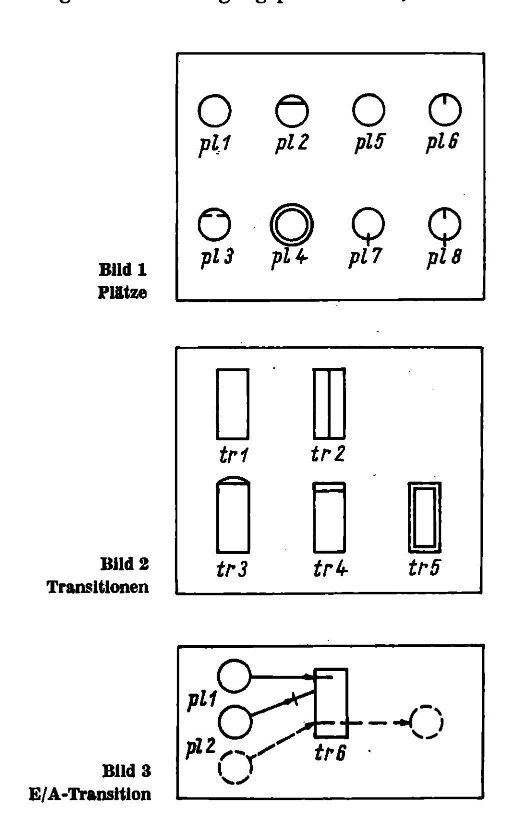


Bild 1 Plätze

Bild 2 Transitionen

Bild 3 E/A-Transition

rung die Transition in den Zustand „Ein“ bzw. „Aus“ versetzt. Eine E/A-Transition kann nur aktiviert werden und schalten, wenn sie im Zustand „Ein“ ist.

Die Schaltregel jeder Transition $tr \in$ **TRE** $\cup$ **TRU** $\cup$ **TRD** setzt sich aus definierten Grundschaltregeln zusammen. Jede Grundschaltregel besteht aus einer fest vorgegebenen Regel und bestimmten Möglichkeiten, Festlegungen entsprechend des zu modellierenden Originalsystems zu treffen. Durch die Grundschaltregel ist dann u. a. festgelegt

- bzgl. jedes Eingangsplatzes der zugehörigen Transition
  - wieviel Marken notwendig sind für das Aktivieren der Transition
  - wieviel Marken bei Schalten der Transition entfernt werden sollen
  - wie diese Marken auszuwählen sind
- ob Marken vernichtet oder erzeugt werden sollen
- auf welche Ausgangsplätze welche Marken zu setzen sind
- wie die Werte der Attributvariablen der zu schaltenden Marken, der Transition und ihrer Ein- bzw. Ausgangsplätze zu bestimmen sind
- wie sich die Werte von Attributvariablen von Dauermarken auf Ausgangsplätzen dauergeschalteter Transitionen ***T***-zeitabhängig zu verändern haben.

Die beiden letzten Punkte werden durch die Angabe von Transitionsprozeduren im BT realisiert.

Ein Teil der Schaltregel wird im GT durch Bezeichnung der Kanten (Elemente von ***CR***) angegeben. Gilt z. B. im Bild 4 $tr\ 1 \in$ **TRE**, $pl\ 1$, $pl\ 2 \in$ **PLE**, dann ist die notwendige und hinreichende Voraussetzung für ein Aktivieren von $tr\ 1$ mak (t, i) $(pl\ 1) \geqq a_1$. Kann $tr\ 1$ zum Zeitpunkt (t, i) schalten, ergibt sich:

$$\text{mak}\ (t, i+1)\ (pl\ 1) := \text{mak}\ (t, i)\ (pl\ 1) - a_2,$$

$$\text{mak}\ (t, i+1)\ (pl\ 2) := \text{mak}\ (t, i)\ (pl\ 2) + \begin{cases} b_1 \\ b_2 \end{cases}.$$

Aus der Menge aller sich auf $pl\ 1$ befindenden Marken werden die $a_2 (\leqq a_1)$ Marken zum Schalten unter Verwendung des Markenwahlverfahrens mav_1 (z. B. FIFO, LIFO, RANDOM) bestimmt. Für nicht bezeichnete Kanten gilt $a_1 = a_2 = 1$, $b_1 = b_2 = 1$, $\text{mav}_1 = \text{FIFO}$. Gilt $b_1 = b_2$ wird anstelle von (b_1, b_2) vereinfacht (b_1) geschrieben.

Ist $pl \in$ **PLD** $\cup$ **PLH** und $tr \in$ **TRD**, dann ist im Falle

$$(pl, tr) \in \textbf{CR} \text{ nur zugelassen } (a_1, a_2) = \begin{cases} (1, 0) \\ (0, 0) \end{cases},$$

$$(tr, pl) \in \textbf{CR} \text{ nur zugelassen } (b_1, b_2) = \begin{cases} (1, 1) \\ (0, 1) \end{cases}.$$

Im Bild 5 sind $pl\ 1$, $pl\ 2 \in$ **PLD**, $tr\ 1 \in$ **TRD**. Gilt mak $(t, 0)$ $(pl\ 1) = d$, dann ist $tr\ 1$ im Zustand „dauergeschaltet“ und es gilt mak $(t, 0)$ $(pl\ 2) = d$.

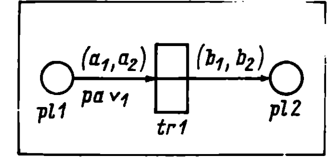


Bild 4
Bezeichnung von Kanten

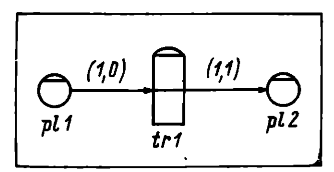


Bild 5
Bezeichnung von Kanten

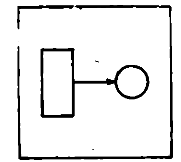


Bild 6. Grundschaltung „Entstehen von Marken“

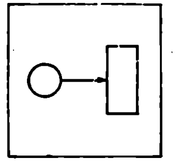


Bild 7. Grundschaltung „Vernichten von Marken“

Durch die grafische Darstellung von Transitionen wird ebenfalls ein Teil der Schaltregel nachgebildet. Beschränkt man sich dabei jedesmal auf diesbezüglich nicht weiter zerlegbare Transitionen, erhält man die Grundtransitionen. Einige davon sollen kurz aufgeführt werden. Eine ausführliche Darstellung findet man in [4] und [6].

Die Grundschaltung ‚Entstehen von Marken‘ zeigt Bild 6. Auf die Darstellung von Eingangsplätzen, durch deren Markierung erst das Schalten der Transition gesichert werden kann, wurde verzichtet. Die Grundschaltung ‚Vernichten von Marken‘ zeigt Bild 7. Die Grundschaltung ‚N-M-Verbindung‘ zeigt Bild 8. Die beim Schalten von $pl\ 1$ abzuziehenden Marken werden zum Platz $pl\ 2$ bewegt. Im Bild 9 ist die Grundschaltung ‚Kopieren‘ dargestellt. Von der von $pl\ 1$ nach $pl\ 2$ bewegten Marke sind b_1 Kopien auf $pl\ 3$ zu setzen. Die Grundschaltung ‚Platzwahl‘ ist im Bild 10 angeführt. Alle beim Schalten der Transition vom Platz $pl\ 1$ abzuziehenden Marken werden entsprechend dem gewählten und im BT anzugebenden Platzwahlverfahren entweder zum Platz $pl\ 2$ oder zum Platz $pl\ 13$ geschaltet.

Einen wichtigen Sonderfall der Grundschaltung Platzwahl stellt die Angabe einer Testbedingung dar. Ist diese erfüllt, werden die Marken zu den Ausgangsplätzen der Transition befördert, deren Kanten durch einen Punkt gekennzeichnet sind. Ist die Testbedingung nicht erfüllt, werden die Marken zu den Ausgangsplätzen geschaltet, deren Kanten ein x haben. Jede Transition darf nur eine Grundschaltung Platzwahl mit dem Platzwahlverfahren „test“ haben (Bild 11).

Mit **POST** (pl) wird die Menge aller Transitionen eines KN bezeichnet, für die $pl \in$ **PL** ein Eingangsplatz ist. Für alle $pl \in$ $\in$ **PLE** $\cup$ **PLH**, für die card (**POST** (pl)) $\geqq 2$ ist, sind ein Verfahren zur Berechnung der Schaltreihenfolge oder eine Schaltreihenfolge selbst im BT festzulegen. Sind zu einem Zeitpunkt (t, i) mehrere Transitionen einer Menge **POST** (pl) aktiviert, wird danach die Transition bestimmt, die schalten darf. Ist nichts festgelegt, soll stets die Transition mit der niedrigeren Nummer zuerst schalten.

Während bei einer E-Transition nur Marken von Eingangsplätzen entfernt werden dürfen, deren Platzverweilzeit bereits abgelaufen ist, erlauben U-Transitionen unter bestimmten Voraussetzungen auch das Entfernen von Marken mit noch nicht abgelaufener Platzverweilzeit. Ein solches Entfernen soll Unterbrechung genannt werden. U-Transitionen können Eingangsplätze haben:

- deren Marken sowohl Unterbrechungen hervorrufen können als auch selbst unterbrochen werden können
- deren Marken nur Unterbrechungen hervorrufen können
- deren Marken nur unterbrochen werden können
- deren Marken weder Unterbrechungen hervorrufen können noch selbst unterbrochen werden können.

Während das Schalten von E- und U-Transitionen ***N***-Zeit verbrauchend ist, benötigt eine sich im Zustand dauergeschaltet befindende D-Transition ***T***-Zeit. Zum besseren Verständnis von

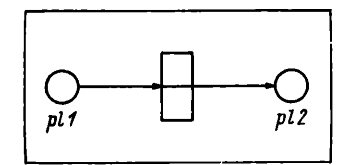


Bild 8
Grundschaltung „N-M-Verbindung"

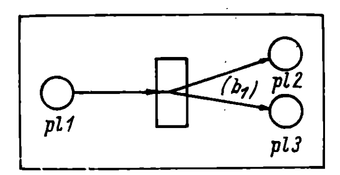


Bild 9
Grundschaltung „Kopieren"

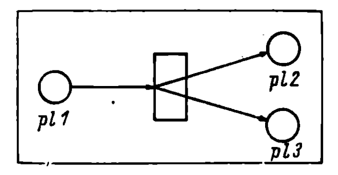
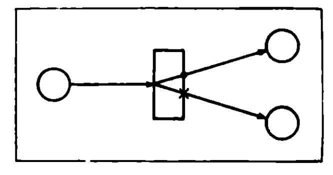


Bild 10
Grundschaltung „Platzwahl"


Bild 11
Platzwahl nach Platzauswahlverfahren „test"

Dauertransitionen werde das folgende Gedankenexperiment durchgeführt. Man betrachte das im Bild 12 gezeigte KN. Man sieht, daß mak $(t_0,0)$ (*pl* 1) = mak $(t_0,0)$ (*pl* 3) = 1. Sei c die fest vorgegebene *T*-Dauer eines Beobachtungsintervalls. Es gelte *pl* 1. *pvz* := *pl* 3. *pvz* := $h := c/n$ ($n \in N$). Die Transitionen *tr* 1 und *tr* 2 schalten zu den *T*-Zeitpunkten $t_0 + h$, $t_0 + 2h$, $t_0 + 3h, \ldots, t_0 + n \cdot h$. Läßt man n gegen Unendlich streben, d. h. h gegen Null, dann schalten *tr* 1 und *tr* 2 unendlich oft, die Plätze *pl* 1, *pl* 2, *pl* 3 und *pl* 4 sind unendlich oft markiert und ebenso oft nicht markiert.

Im Grenzfall heißen die Transitionen dauergeschaltet, die Plätze *pl* 2, *pl* 3 und *pl* 4 sind dauermarkiert. Das KN im Bild 12 geht in das KN im Bild 13 über. Einige ausgewählte D-Grundtransitionen sollen kurz beschrieben werden.

Die Transition *tr* 1 im Bild 14 ist eine N2-Dauertransition; *tr* 1 ist dauergeschaltet, wenn *tr* 1 im Zustand „Ein" ist und *pl* 1 dauermarkiert ist. Dann ist auch *pl* 2 dauermarkiert. Des weiteren kann noch *pl* 3 dauermarkiert sein, was eine Dauermarkierung von *pl* 4 nach sich zieht. Im Bild 15 ist eine FG-Dauertransition gezeigt. In der Transitionsprozedur steht, wie die Werte der Attributvariablen der zugehörigen Dauermarke zu berechnen sind. Platz *pl* 3 ist dauermarkiert genau dann, wenn *tr* 1 im Zustand „Ein" ist.

Bei den in den Bildern 16 und 17 gezeigten I-Dauertransitionen *tr* 1 und *tr* 2 unterscheidet man zwischen dem Übergang in den Zustand dauergeschaltet, den Zustand dauergeschaltet und den Übergang in den Zustand nicht dauergeschaltet. Die Transition *tr* 1 bzw. *tr* 2 geht in den Zustand dauergeschaltet über, wenn gilt

$$\text{mak}\,(t', i)\,(pl\ 1) = d \quad \text{und} \quad \text{mak}\,(t', i)\,(pl\ 3) = 1\,.$$

Es ergibt sich

$$\text{mak}\,(t', i+1)\,(pl\ 2) = d \quad \text{und}$$

$$\text{mak}\,(t', i+1)\,(pl\ 3) = d \text{ bzw. } = 0\,.$$

Platz *pl* 1 sei bis zur *T*-Zeit t'' dauermarkiert, dann gelte mak (t'', j) (*pl* 1) = 0. Daraus folgt mak $(t'', j+1)$ (*pl* 2) = 0 und mak $(t'', j+1)$ (*pl* 3) = 1. Sei *ma* 3 mit *attr* 1 die Marke auf *pl* 3. Dann gilt: *ma* 3. *attr* 1 := *pl* 3. *ma* 3. *attr* 1 (t''); *ma* 3. *attr* 1 kann erst dann wieder seinen Wert verändern, wenn *tr* 1 bzw. *tr* 2 in den Zustand dauergeschaltet übergeht. Dazu ist die Markierung von *pl* 3 notwendig. Obwohl *pl* 3 im Falle *tr* 2 nicht markiert ist, verbleibt *tr* 2 im Zustand dauergeschaltet.

Die graphische Darstellung eines KN kann dadurch wesentlich erleichtert werden, daß man für geeignete Teilnetze vom KN K-Transitionen bzw. K-Plätze verwendet. Die Beschreibung der K-Elemente als *KN* 1, *KN* 2, ... erfolgt dann außerhalb vom ursprünglichen Kombi-Netz. Das ist besonders vorteilhaft, wenn bestimmte Teilnetze mehrmals auftreten.

Kombi-Netze dürfen auch „gefärbt" werden. Den Plätzen werden aus der endlichen Menge aller „Farben" Teilmengen zugeordnet, jeder auf einem Platz ankommenden Marke wird eine „Farbe" zugewiesen. Entsprechend der Anzahl unterschiedlicher Schaltfunktionen, verbunden mit unterschiedlichen Transitionsprozeduren, werden auch den Transitionen „Farben" zugeordnet. Beachtet werden muß, daß erforderlichenfalls eine Schaltreihenfolge bezüglich der „Farben" anzugeben ist.

3. Beispiel

Es wird ein gemischtes offenes Bedienungssystem mit einem einkanaligen Bedienungsknoten und begrenzter Warteraumkapazität betrachtet. Die Zwischenankunftszeit der Forderungen sei exponentialverteilt. Jede Forderung besitzt eine Eigenschaft, die durch den Wert von *attr* 1 nachgebildet wird. Beim

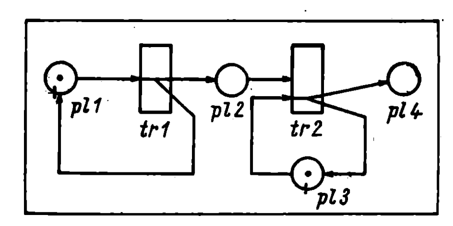


Bild 12
KN mit E-Transitionen

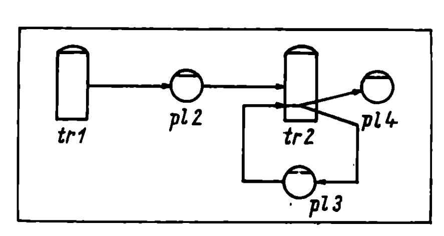


Bild 13
KN mit D-Transitionen

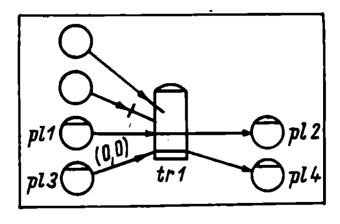


Bild 14
N2-Dauertransition

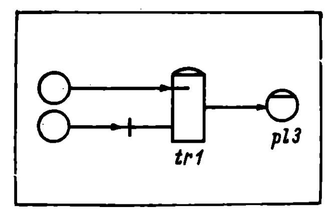


Bild 15
FG-Dauertransition

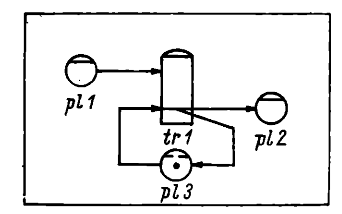


Bild 16
I-Dauertransition mit Hybridplatz

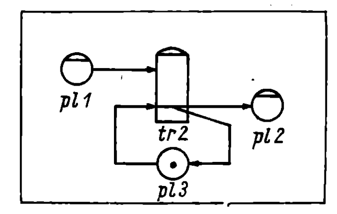


Bild 17
I-Dauertransition mit Elementarplatz

tr 1: *ma* 1. *attr* 1 := *ma* 1. *attr* 2 := *normal* (60, 12, *u* 2),
ma 1. *dauer* := *time*.
tr 2: *da* 2. *umgebung* (*time*) := *f* 2 (*time*).
tr 3: *ma* 1. *dauer* := *time* — *ma* 1. *dauer*,
ma 1. *attr* 1 := *f* 1 (*ma* 1. *attr* 2, *ma* 1. *dauer*, *tr* 3. *kon* 1),
ma 1. *zeit* := *time*.
tr 5: *da* 1. *attr* 1 (*time*) := lösung von DGL (*ma* 1. *attr* 2,
ma 1. *zeit*, *da* 2. *umgebung* (*time*),
time).
tr 6: *tr* 6. *grenzee* := *ma* 3. *grenze* (beim Übergang in Zustand dauergeschaltet),
test: *da* 1. *attr* 1 (*time*) = *tr* 6. *grenzee*,
ma 1. *attr* 1 := *da* 1. *attr* 1 (*time*)
ma 1. *dauer* := *time* — *ma* 1. *zeit*
(beim Übergang in den Zustand nicht dauergeschaltet).
tr 8: *ma* 3. *grenze* := *randint* (320, 400, *u* 3).
Schaltreihenfolge: *tr* 4 vor 7 *tr*.

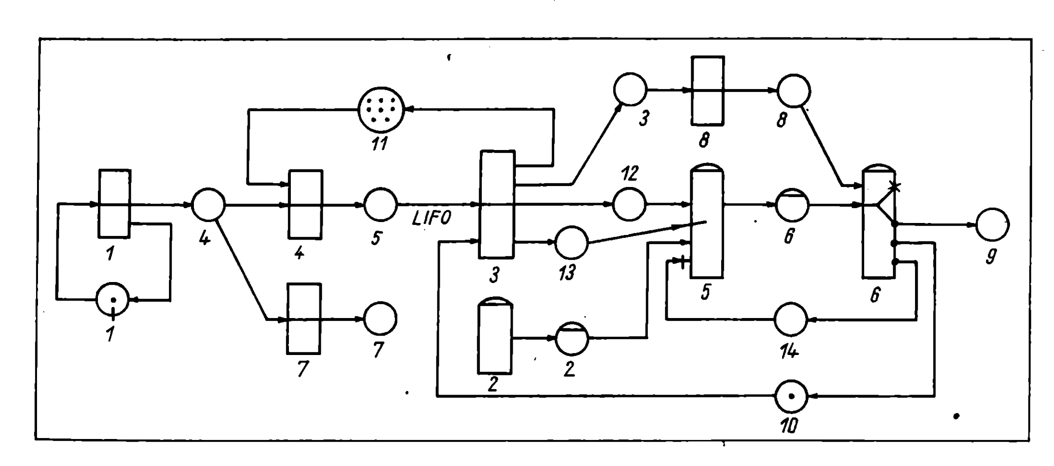


Bild 18
Grafischer Teil eines Kombi-Netzes für ein gemischtes offenes Bedienungssystem

Entstehen errechnet sich der Wert von *attr* 1 aus einer Normalverteilung. Dieser Wert verändert sich im Warteraum. Er kann beim Verlassen des Warteraumes in Abhängigkeit von der Wartezeit berechnet werden. *attr* 1 muß im Bedienungskanal einen bestimmten, beim Eintritt der Forderung auf Grund einer Gleichverteilung errechneten Wert, erreichen. Die Änderung des Wertes von *attr* 1 hängt auch von Einflüssen aus der Umgebung ab und wird durch eine gewöhnliche Differentialgleichung beschrieben.

Bild 18 zeigt für dieses Beispiel den grafischen Teil eines Kombinetzes. Dabei bedeutet die Anzahl der Marken auf Platz

— *pl* 5 Anzahl der wartenden Forderungen
— *pl* 7 Anzahl der abgewiesenen Forderungen
— *pl* 9 Anzahl der bedienten Forderungen
— *pl* 11 freie Warteraumkapazität.

Ist *pl* 10 markiert, ist der Bedienungskanal frei. Eine Markierung von *pl* 14 erfolgt, wenn die Bedienung einer Forderung beendet ist. Eine Markierung von *pl* 13 zeigt an, daß eine nächste Forderung zu bedienen ist.

Beschreibender Teil vom Kombi-Netz (Notierung erfolgt in Anlehnung an SIMULA): Die Attributvariablen von *ma* 1 sind *attr* 1, *attr* 2, *zeit*, *dauer*; *da* 2 hat die Attributvariable *umgebung* und *ma* 3 besitzt die Attributvariable *grenze*.

Anfangsmarkierung: mak (0, 0) (*pl* 1) = mak (0, 0) (*pl* 10) = 1,
mak (0, 0) (*pl* 11) = warteraumkapazität.

Platzverweilzeiten: *pl* 1. *pvz* := negexp (52, *u* 1).

Konstantenzuweisung: *tr* 3. *kon* 1 := parameter 1.

Transitionen mit zugehörigen Transitionsprozeduren:

Literatur

[1] *Cellier, F. E.:* Combined continuous/discrete system simulation by use of digital computers: techniques and tools. Dissertation Zürich 1979.
[2] *Gerhardt, H.-D.:* Arbeit mit kombinierten Modellen. Wissenschaftliche Tagung zu Fragen der Ausbildung in Informationsverarbeitung des Maschineningenieurwesens, TH Karl-Marx-Stadt 1981. Tagungsberichte, S. 58—66.
[3] *Gerhardt, H.-D.:* Kombi-Netze als Grundlage für die Aufstellung mathematischer Modelle kombinierter Sytseme. 9. Jahrestagung. ,,Grundlagen der Modellierung und Simulationstechnik". Rostock 1980. Kurzreferate, S. 4/1—4/3.
[4] *Gerhardt, H.-D.:* Kombi-Netze. Eine Petri-Netzerweiterung zur Beschreibung kombinierter mathematischer Modelle. WZ der HuB, Math.-Nat. Reihe (im Druck).
[5] *Gerhardt, H.-D.:* Mathematische Modellbildung als schrittweiser Entwurfsprozeß. WZ der HuB, Math.-Nat. Reihe (im Druck).
[6] *Gerhardt, H.-D.:* Theoretische Grundlagen der kombinierten Systemsimulation. Dissertation, Berlin 1981.
[7] *Jensen, K.:* Coloured Petri Nets and the Invariant — Method. DAIMI PB-104. Aarhus 1980.
[8] *Noe, J. D.:* Pro-Nets: For Modeling Processes and Processors. Washington. Technical Report 75-07-15. University of Washington, Department of Computer Science, 1975.
[9] *Petri, C. A.:* Concepts of Net Theory. Mathematical Foundations of Computer Science. Proceedings of Symposium and Summer School. High Tatras 1973, S. 137—146.
[10] *Starke, P. H.:* Free Petri Net Languages. Humboldt-Universität zu Berlin, Sektion Mathematik, Seminarbericht Nr. 7/1978.
[11] *Starke, P. H.:* Petri-Netze. Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften 1980.

msr 7488

Prof. Dr.-Ing. habil. *W. Sauer*, Dresden[1])

Theorie der Erzeugnisflußgraphen und ihre Anwendung zur Modellierung stochastischer Fertigungsprozesse

IA 1.1.

0. Einleitung

In Fertigungsprozessen (Stückgutprozessen) ist ein sogenannter Erzeugnisfluß zu beobachten, wobei die zu bearbeitenden, zu montierenden, zu prüfenden, zu transportierenden ... Arbeitsgegenstände hier verallgemeinert als „Erzeugnisse" bezeichnet werden sollen. Der Erzeugnisfluß (auch Materialfluß, Stofffluß genannt) läßt sich mit den Methoden der Graphentheorie erfassen, wozu eine systemtheoretische Betrachtungsweise der Fertigungsprozesse erforderlich ist.

1. Erzeugnisfluß in Fertigungsprozessen

Fertigungsprozesse bestehen aus einer Menge von N Elementen („Prozeßelementen") E_n ($n = 1, 2, \ldots, N$), in denen Bearbeitung, Montage, Prüfung, Transport ... der Erzeugnisse erfolgt und einer Menge von V Relationen L_k ($k = 1, 2, \ldots, K$) zwischen den Elementen zur Pufferung, Lagerung, Speicherung ... der Erzeugnisse. Jedem Element E_n wird ein Pfeil und jeder möglichen Relation L_k ein Knoten zugeordnet. Dadurch entsteht ein Graph, der in Analogie zum Signalflußgraphen (z. B. [1]) als Erzeugnisflußgraph bezeichnet werden soll [2].
Ein Erzeugnisflußgraph gibt für ein bestimmtes Erzeugnis die Gesamtheit aller möglichen „Wege" im Fertigungsprozeß an. Zum Beispiel existieren für den im Bild 1 angegebenen Erzeugnisflußgraphen zwei Wege:

1. $E_1 \to E_2 \to E_3$
2. $E_1 \to E_2 \to E_4 \to E_2 \to E_3$.

Dabei bedeuten: E_1 Bearbeitung; E_2 Prüfung; E_3 Montage; E_4 Fehlerbeseitigung.
Der 2. Weg wird von dem Anteil der Erzeugnisse durchlaufen, der aufgrund der Prüfung als defekt zurückgewiesen wird. Dieser Anteil soll mit w_4 bezeichnet werden.
Allgemein existiert für jedes Element E_n eine sogenannte Realisierungswahrscheinlichkeit w_n, und es gilt für jeden Knoten L_k die Regel, daß die Summe der Realisierungswahrscheinlichkeiten aller von L_k wegführenden Pfeile gleich 1 sein muß (da ja das Erzeugnis auf irgendeinem Weg „weiterfließt"). Aus Bild 1 entnimmt man dann

$$w = 1; \qquad w_2 = 1; \qquad w_3 + w_4 = 1\,. \tag{1}$$

Das Gleichungssystem Gl. (1) heißt allgemein System der Bilanzgleichungen. Aus Bild 1 ist leicht zu ersehen, daß die Rückführschleife $E_2\,E_4$ auch mehrfach von einem Erzeugnis durchlaufen werden kann.

2. Operatoren

Neben der Realisierungsgeschwindigkeit w_n existiert für jedes Element E_n noch eine zweite Kenngröße: die Prozeßdauer T_n. Sie schwankt i. allg. von Erzeugnis zu Erzeugnis und wird daher als Zufallsgröße mit der Dichte $f_n(t)$ interpretiert. Beide Kenngrößen werden zusammengefaßt als Gewichtsfunktion

$$g_n(t) = w_n \cdot f_n(t) \tag{2}$$

und durch Laplace-Transformation in die Übertragungsfunktion

$$G_n(p) = L\,\{g_n(t)\} = \int_0^\infty g_n(t) \cdot e^{-pt}\,dt \tag{3}$$

überführt [2]. $G_n(p)$ heißt auch Operator des Prozeßelementes E_n. Den Operator $G_{ges}(p)$ für den Gesamtprozeß errechnet man mit den Mitteln der Signalflußgraphentheorie (z. B. Mason-Formel).
Für den Prozeß mit Kettenstruktur erhält man dabei (Bild 2):

$$G_{ges}(p) = G_1(p) \cdot G_2(p) \ldots G_N(p) = \prod_{n=1}^{N} G_n(p)\,. \tag{4}$$

Für einen Prozeß mit Parallelstruktur ergibt sich (Bild 3)

$$G_{ges}(p) = \sum_{n=1}^{N} G_n(p)\,. \tag{5}$$

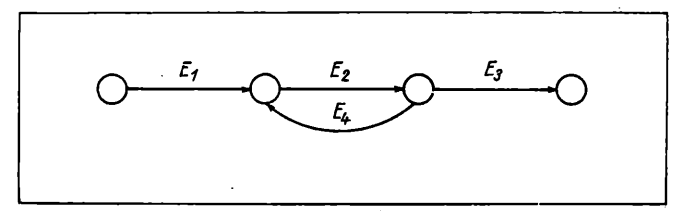


Bild 1. Erzeugnisflußgraph mit Rückführstruktur (Rückführprozeß)

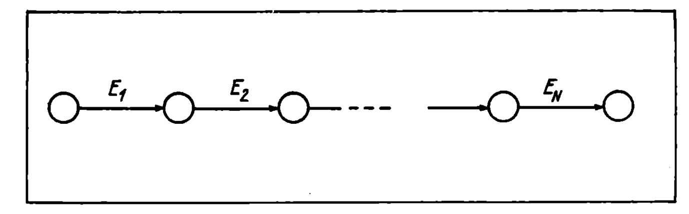


Bild 2. Kettenprozeß

Für den im Bild 1 angegebenen Prozeß mit Rückführstruktur lautet der Gesamtoperator

$$G_{ges}(p) = \frac{G_1(p) \cdot G_2(p) \cdot G_3(p)}{1 - G_2(p) \cdot G_4(p)}\,. \tag{6}$$

$G_{ges}(p)$ läßt sich auch mit Hilfe einer symbolischen Methode bestimmen [3].

3. Berechnung der Prozeßparameter aus dem Operator

Als Prozeßparameter interessieren in der Praxis

1. die Realisierungswahrscheinlichkeit w_n (hier gelten die Bilanzgleichungen)
2. der Erwartungswert μ_n der Prozeßdauer:

$$\mu_n = \int_{-\infty}^{+\infty} t \cdot f(t)\,dt\,. \tag{7}$$

Er entspricht in der Praxis dem Mittelwert der Prozeßdauer

3. die Steuerung σ_n^2 der Prozeßdauer:

$$\sigma_n^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (t - \mu_n)^2 \cdot f(t)\,dt\,. \tag{8}$$

[1]) Vortrag anläßlich der 10. Jahrestagung „Grundlagen der Modellierung und Simulation" (8. bis 10. Dezember 1981) in Rostock.
Mitteilung aus der TU Dresden, Sektion Elektronik-Technologie und Feingerätetechnik.

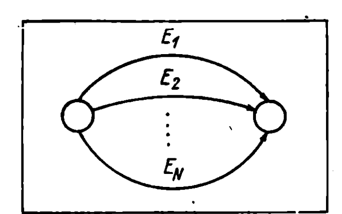


Bild 3. Parallelprozeß

3.1. *Berechnung von w_n aus $G_n(p)$*

Man erhält aus Gl. (3) und Gl. (2) leicht durch Grenzwertbildung

$$w_n = \lim_{p \to 0} G_n(p) = G_n(0). \tag{9}$$

3.2. *Berechnung von μ_n aus $G_n(p)$*

Gleichung (3) wird nach p differenziert, und mit Gln. (2) und (7) erhält man

$$\mu_n = -\frac{1}{w_n} \cdot \lim_{p \to 0} \left\{\frac{dG_n(p)}{dp}\right\} = -\frac{G'_n(0)}{G_n(0)}. \tag{10}$$

3.3. *Berechnung von σ_n^2 aus $G_n(p)$*

Gleichung (3) wird nach p zweimal differenziert, und mit Gln. (2) und (8) erhält man

$$\sigma_n^2 = \frac{G''_n(0)}{G_n(0)} - \left(\frac{G'_n(0)}{G_n(0)}\right)^2 = \left(\frac{G'_n(0)}{G_n(0)}\right)' \tag{11}$$

bzw.

$$\sigma_n^2 + \mu_n^2 = \frac{G''(0)}{G(0)}.$$

Die Berechnungsgleichungen (9) bis (11) gelten sämtlich auch für den Gesamtprozeß, d. h. zur Berechnung von w_{ges}, μ_{ges} und σ_{ges}^2 aus $G_{ges}(p)$.
Setzt man dabei noch für die Elemente die jeweiligen Parameter ein, so erhält man für die jeweilige Struktur einen allgemeingültigen Zusammenhang [2].
Beispielsweise errechnet man für den Erzeugnisflußgraphen nach Bild 1 mit Hilfe Gl. (10) aus Gl. (6) und Gl. (1):

$$\mu_{ges} = \mu_1 + \mu_2 + \mu_3 + \frac{w_4}{1 - w_4}(\mu_2 + \mu_4). \tag{12}$$

Bemerkenswert ist dabei, daß Gl. (12) völlig unabhängig von der Dichtefunktion gilt.
Für die reine Kettenstruktur gilt natürlich (s. Bild 2)

$$\mu_{ges} = \sum_{n=1}^{N} \mu_n; \quad \sigma_{ges}^2 = \sum_{n=1}^{N} \sigma_n^2, \tag{13}$$

und für die reine Parallelstruktur (Bild 3) errechnet man leicht

$$\mu_{ges} = \sum_{n=1}^{N} w_n \cdot \mu_n; \quad \sigma_{ges}^2 + \mu_{ges}^2 = \sum_{n=1}^{N} w_n(\sigma_n^2 + \mu_n^2). \tag{14}$$

Die Berechnung der Streuung für den Rückführprozeß nach Bild 1 erweist sich dagegen schon als recht kompliziert. Daher wurde der im nächsten Abschnitt gezeigte Weg zur Berechnung der allgemeinen Zusammenhänge zwischen den Elemente-Parametern und den Parametern des Gesamtprozesses entwickelt.

4. Berechnung der Parameter des Gesamtprozesses aus den Elementeparametern

Der Operator für den Gesamtprozeß läßt sich stets als Funktion mit N Variablen $G_1, G_2, \ldots, G_N$ auffassen, die ihrerseits wiederum von p abhängen:

$$G_{ges}(p) = G_{ges}[G_1(p), G_2(p), \ldots, G_N(p)]. \tag{15}$$

Unabhängig von der jeweiligen Struktur lassen sich hieraus allgemeine Berechnungsvorschriften für die Parameter angeben.

4.1. *Berechnung von w_{ges}*

Aus Gl. (15) folgt mit Gl. (9)

$$w_{ges} = G_{ges}(w_1, w_2, \ldots, w_N), \tag{16}$$

d. h. also, man ersetzt in der Gleichung für den Gesamtoperator sämtliche $G_n(p)$ einfach durch w_n.
Falls zwischen Start- und Zielknoten keine Erzeugnisse den Prozeß verlassen, gilt stets $w_{ges} = 1$.

4.2. *Berechnung von μ_{ges}*

Aus Gl. (15) erhält man durch Differentation nach p

$$G'_{ges}(p) = \sum_{n=1}^{N} \frac{\partial G_{ges}}{\partial G_n} \cdot G'_n(p) \tag{17}$$

und mit Gleichung (10)

$$\mu_{ges} = \sum_{n=1}^{N} c_n \cdot \mu_n, \tag{18}$$

mit

$$c_n = \frac{w_n}{w_{ges}} \cdot \left.\frac{\partial G_{ges}}{\partial G_n}\right|_{p=0}.$$

Bemerkenswert ist, daß sich μ_{ges} stets additiv aus den einzelnen μ_n mit den Intensitätskoeffizienten c_n zusammensetzt.

4.3. *Berechnung von σ_{ges}^2*

Durch Differentiation von Gl. (17) nach p folgt mit Gl. (11):

$$\sigma_{ges}^2 + \mu_{ges}^2 = \sum_{n=1}^{N} c_n(\sigma_n^2 + \mu_n^2) + \sum_{m=1}^{N} \sum_{n=1}^{N} d_{mn} \cdot \mu_m \cdot \mu_n, \tag{19}$$

mit

$$d_{mn} = \frac{w_m \cdot w_n}{w_{ges}} \cdot \left.\frac{\partial^2 G_{ges}}{\partial G_m \cdot \partial G_n}\right|_{p=0}.$$

Damit stehen Berechnungsgleichungen zur Verfügung, mit denen sich die wichtigsten Parameter des Gesamtprozesses recht einfach aus den Elementeparametern ermitteln lassen.

5. Intensität von Fertigungsprozessen

Die Anzahl der Erzeugnisse, die je Zeiteinheit durch das Prozeßelement E_n fließt, heißt Intensität.
Sie ist ebenfalls eine Zufallsgröße. Der Erwartungswert der Intensität I_n ist gegeben zu

$$I_n = \frac{1}{\mu_n}. \tag{20}$$

Diese Intensität wird aber für den Gesamtprozeß nicht wirksam, da durch die Intensitätskoeffizienten c_n die effektive Intensität $I_{n\,eff}$ zu

$$I_{n\,eff} = \frac{1}{c_n \cdot \mu_n} \tag{21}$$

entsteht. Da nun die Pufferlager zwischen den Prozeßelementen einen stationären mittleren Bestand aufweisen müssen, muß gelten:

$$c_1\mu_1 = c_2\mu_2 = \ldots = c_n\mu_n = \ldots = c_N\mu_N = \tau_{ges}. \tag{22}$$

Dieses nennt man Prozeßabgleich. Beachtet man noch, daß für die Intensitätskoeffizienten der Knotensatz gilt, nämlich, daß die Summe aller auf einen Knoten zuführenden Intensitätskoeffizienten gleich der Summe aller von einem Knoten wegführenden Intensitätskoeffizienten sein muß, so ist offensicht-

lich, daß in der Praxis selten ein exakter Prozeßabgleich erreichbar ist, denn μ_n ist i. allg. nicht beliebig frei wählbar.
Bei Abgleich ist die Gesamtintensität gegeben durch

$$I_{ges} = \frac{1}{\tau_{ges}} . \tag{23}$$

τ_{ges} heißt (stochastische) Taktzeit.
Bei Nichtabgleich ergibt sich ein sog. Nadelöhr E_k^*. Den Index k erhält man dadurch, daß man das Minimum der effektiven Intensität sucht, d. h.

$$k = \arg\left\{\min_n \left\{\frac{1}{c_n \mu_n}\right\}\right\} = \arg\left\{\max_n \{c_n \mu_n\}\right\}. \tag{24}$$

Setzt man noch

$$c_n \cdot \mu_n = \tau_n , \tag{25}$$

so erkennt man, daß jedes Prozeßelement eine mittlere Zeitreserve

$$\Delta\tau_n = c_k \cdot \mu_k - c_n \cdot \mu_n = \tau_{ges} - \tau_n \tag{26}$$

(bezogen auf τ_{ges}) und damit eine mittlere Intensitätsreserve

$$\Delta I_n = \frac{1}{\mu_n} - \frac{1}{\mu_k} \cdot \frac{c_n}{c_k} \tag{27}$$

hat, die nicht wirksam wird. Die Gesamtdauer D des Durchlaufs eines Erzeugnisses durch den Prozeß ist

$$D = N \cdot \tau_{ges} \tag{28}$$

mit

$$\tau_{ges} = c_k \cdot \mu_k = \max_n \{c_n \cdot \mu_n\} . \tag{29}$$

Beispiel: Für den im Bild 4 angegebenen Fertigungsprozeß erhält man

$$G_{ges}(p) = \frac{[G_1(p) \cdot G_2(p) + G_5(p)] \cdot G_3(p) \cdot G_4(p)}{1 - G_2(p)\, G_3(p) \cdot G_6(p)} .$$

Es seien $w_5 = 0{,}6$ und $w_6 = 0{,}2$. Weiterhin soll gelten (in Minuten) $\mu_1 = 11$; $\mu_2 = 6$; $\mu_3 = 4$; $\mu_4 = 3$; $\mu_5 = 5$; $\mu_6 = 4$. Man errechnet leicht: $c_1 = 0{,}4$; $c_2 = 0{,}65$; $c_3 = 1{,}25$; $c_4 = 1$; $c_5 = 0{,}6$; $c_6 = 0{,}25$. Der Prozeß ist nicht angepaßt. E_3 ist das Nadelöhr. Man berechnet $\tau_{ges} = 5$ min. Im Prozeß werden also im Mittel $I_{ges} = 12$ Erzeugnisse je Stunde hergestellt, wobei jedes Erzeugnis mindestens $D = 30$ min durch den Prozeß läuft.

6. Rationalisierung von Fertigungsprozessen

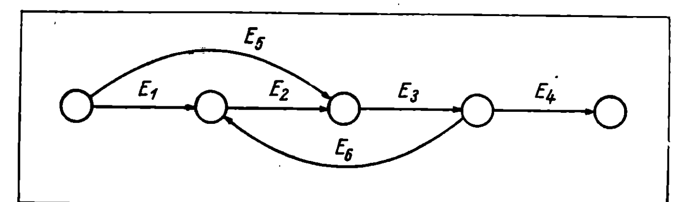
Durch die Intensitätsreserven ΔI_n ist eine Rationalisierung auf verschiedene Weise möglich:

1. Einsparung von Arbeitskräften (Arbeitsplätzen) durch Zusammenlegen von zwei Prozeßelementen E_i und E_j zu einem Element; es muß gelten:

$$\tau_i + \tau_j \leqq \tau_{ges} . \tag{30}$$

   Dabei entsteht aber keine Intensitätssteigerung des Gesamtprozesses. Im Beispiel (Bild 4) können die Elemente E_4 und E_6 gemeinsam von einer einzigen Arbeitskraft ausgeführt werden.

Bild 4. Erzeugnisflußgraph mit gemischter Struktur



2. Verringerung der Gesamtintensität durch Zusammenlegen des Nadelöhrprozesses E_k^* mit einem anderen Prozeßelement E_l ohne Einsparung von Arbeitskräften. Jede der beiden Arbeitskräfte führt hierbei parallel beide Prozesse E_k^* und E_l durch. Dabei entsteht für jeden der beiden neuen (zusammengefaßten) Arbeitsplätze die Belastung

$$\tfrac{1}{2}\,(c_l\mu_l + c_k\mu_k) ,$$

   wobei ein neues Nadelöhr entstehen kann.
   Im Beispiel (Bild 4) können die Prozesse E_3 und E_5 zusammengefaßt werden. Dadurch entsteht als neues Nadelöhr E_1 mit $\tau_{ges} = 4{,}4$ min. Man erreicht damit eine Intensitätssteigerung des Gesamtprozesses auf 13,6 Erzeugnisse je Stunde und erhält außerdem für die Arbeitskräfte bei E_3 und E_5 einen höheren Arbeitsinhalt. Diese Methode der Zusammenfassung von Prozeßelementen kann weitergeführt werden.
3. Die Intensitätsreserven können im Fertigungsbetrieb für andere Aufgaben genutzt werden.
4. Eine weitere Möglichkeit der Rationalisierung besteht darin, die Intensität der jeweiligen Nadelöhrprozesse zu erhöhen. Auf die dabei entstehenden Optimierungsfragen wird in [4] hingewiesen.

Literatur

[1] *Ilmer, H.-U.:* Signalflußgraphen in der Elektronik. Berlin: VEB Verlag Technik 1977.
[2] *Sauer, W.:* Analyse technologischer Prozesse mittels Erzeugnisflußgraphen. Wiss. Zeitschrift der TU Dresden 30 (1981) H. 2/3, S. 147–150.
[3] *Sauer, W.:* Eine symbolische Methode zur Berechnung der mittleren Dauer stochastischer technologischer Prozesse. Wiss. Zeitschrift der TU Dresden 29 (1980) H. 1, S. 261–265.
[4] *Weidenmüller, G.; Sauer, W.:* Ein Verfahren zur optimalen Dimensionierung technologischer Prozesse. Wiss. Zeitschrift der TU Dresden 25 (1976) H. 1/2, S. 217–223.

msr 7489

Dipl.-Math. *A. Wittmüß*, Berlin[1])

Strukturelle Dekomposition komplexer Systeme

IA 2.3.1.7.

0. Einleitung

Die Analyse bzw. Steuerung komplexer Systeme (d. h. Systeme, zu deren Beschreibung viele Zustandsvariable notwendig sind) ist eine sehr unübersichtliche Aufgabe. Eine bessere Überschaubarkeit eines komplexen Systems kann oftmals durch die Zerlegung (Dekomposition) des Systems in weitgehend autonome Teilsysteme erreicht werden.

Hier wird folgende Aufgabe betrachtet: Gegeben ist ein System S, das durch ein Gleichungs- oder Differentialgleichungssystem beschrieben wird. Gesucht ist eine Zerlegung des Systems S in Teilsysteme S_i, so daß die Anzahl der Variablen, die in mehr als einem Teilsystem auftreten, möglichst klein wird. Jedes Teilsystem wird durch ein Teilgleichungssystem beschrieben. In keinem Teilgleichungssystem dürfen mehr als M Gleichungen enthalten sein.

Die Lösung der Aufgabe erfolgt in zwei Schritten. Dem System S wird ein Strukturgraph G_S zugeordnet. Dieser Strukturgraph wird mit einem einfachen Verfahren in Teilgraphen zerlegt. Diese Zerlegung erzeugt ein Netzwerk. Es wird eine optimale Zerlegung des Netzwerkes bestimmt, die eine Lösung des obigen Problems liefert.

1. Strukturgraph

Gegeben sei ein System S, beschrieben durch

$$S: \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_1(x) \\ \vdots \\ f_m(x) \end{pmatrix}, \qquad x \in \boldsymbol{R}^n . \tag{1}$$

Man ordnet jedem f_i $(i = 1, \dots, m)$ einen charakteristischen Vektor zu. Diesen Vektor nennt man $\boldsymbol{k}_i = (k_{i1}, \dots, k_{in})$. Es wird festgelegt:

$$k_{ij} := \begin{cases} 1, \text{ wenn } x_j \text{ als unabhängige Variable bei } f_i \text{ auftritt} \\ 0, \text{ sonst} . \end{cases} \tag{2}$$

Es ist nun möglich, durch die folgenden Festlegungen einen bewerteten Graphen $G_S = (\boldsymbol{V}_S, \boldsymbol{E}_S, h)$ zu erzeugen:

1) $\boldsymbol{V}_S$ ist die Knotenmenge von G_S. Jedem f_i entspricht genau ein Knoten $v_i \in \boldsymbol{V}_S$.
2) $\boldsymbol{E}_S = \binom{\boldsymbol{V}_S}{2}$ ist die Kantenmenge von G_S. Für je zwei Knoten $v_{i_1}, v_{i_2} \in \boldsymbol{V}_S$ gilt: $(v_{i_1}, v_{i_2}) \in \boldsymbol{E}_S$.
3) Die Abbildung $h: \boldsymbol{E}_S \to N$ ist die Kantengewichtsfunktion.

$$h((v_{i_1}, v_{i_2})) := \sum_{j=1}^{n} k_{i_1 j} \cdot k_{i_2 j} . \tag{3}$$

Das Kantengewicht $h((v_{i_1}, v_{i_2}))$ gibt an, wieviele gemeinsame Variable die zugehörigen Funktionen f_{i_1}, f_{i_2} haben. Der Graph G_S soll der dem System S zugeordnete Strukturgraph heißen. Der Strukturgraph G_S ist ein vollständiger Graph ohne parallele Kanten und ohne Schleifen. Ein solcher Graph wird auch ein vollständiger schlichter Graph genannt.

Als Häufigkeit der Variablen x_j $(1 \leqq j \leqq n)$ wird der folgende Ausdruck bezeichnet:

$$g(x_j) := \sum_{i=1}^{m} k_{ij} , \tag{4}$$

d. h. $g(x_j)$ gibt an, in wievielen Funktionen f_i die Variable x_j auftritt. Eine Variable soll erzeugende Variable für eine Kante (v_{i_1}, v_{i_2}) heißen, genau dann, wenn gilt: $k_{i_1 j} = k_{i_2 j} = 1$. Sei $(v_{i_1}, v_{i_2}) \in \boldsymbol{E}_S$ eine beliebige Kante. Man nennt diese Kante eine einfache Kante, wenn alle ihre erzeugenden Variablen die Häufigkeit 2 haben. Im anderen Fall heißt die Kante (v_{i_1}, v_{i_2}) eine mehrfache Kante. Mit anderen Worten: (v_{i_1}, v_{i_2}) ist eine einfache Kante, falls die gemeinsamen Variablen der zugehörigen Funktionen f_{i_1}, f_{i_2} nur in diesen beiden Funktionen auftreten. Dagegen handelt es sich um eine mehrfache Kante, wenn eine oder mehrere der gemeinsamen Variablen der Funktionen f_{i_1}, f_{i_2} in weiteren Funktionen als Variable auftreten. Es gilt:

$$\sum_{j=1}^{n} \binom{g(x_j)}{2} = \sum_{(v_{i_1}, v_{i_2}) \in \boldsymbol{E}_S} h((v_{i_1}, v_{i_2})) . \tag{5}$$

Mit Hilfe dieser Tatsache läßt sich zeigen: Ein Strukturgraph enthält nur einfache Kanten genau dann, wenn

$$\sum_{(v_{i_1}, v_{i_2}) \in \boldsymbol{E}_S} h((v_{i_1}, v_{i_2})) = n , \tag{6}$$

ist. Mehrfache Kanten können im Strukturgraphen nie einzeln vorkommen. Es ist vielmehr so, daß eine mehrfache Kante stets in mindestens einem geschlossenen Kantenzug der Länge 3 auftreten muß, wobei die restlichen beiden Kanten des geschlossenen Kantenzuges ebenfalls mehrfache Kanten sind. Daraus erhält man: Ein Strukturgraph G_S, der keinen geschlossenen Kantenzug der Länge 3 enthält, hat nur einfache Kanten.

2. Einfache Zerlegung des Strukturgraphen

$\boldsymbol{Z} = \{z_1, \dots, z_l\}$ soll eine p-einfache Zerlegung eines Strukturgraphen heißen, wenn gilt:

1) Jedes $z_k \in \boldsymbol{Z}$ $(1 \leqq k \leqq l)$ ist ein Teilgraph $z_k = (\boldsymbol{V}_S^k, \boldsymbol{E}_S^k, h^k)$ von G_S, hierbei ist h^k die Einschränkung von h auf die Kantenmenge $\boldsymbol{E}_S^k$.
2) Für $z_{k_1}, z_{k_2} \in \boldsymbol{Z}$ mit $k_1 \neq k_2$ ist $\boldsymbol{V}_S^{k_1} \cap \boldsymbol{V}_S^{k_2} = \emptyset$ und $\boldsymbol{E}_S^{k_1} \cap \boldsymbol{E}_S^{k_2} = \emptyset$. (7)
3) $\bigcup_{z_k \in \boldsymbol{Z}} \boldsymbol{V}_S^k = \boldsymbol{V}_S$.
4) $\boldsymbol{Z}$ entsteht aus G_S durch das Entfernen aller Kanten $(v_{i_1}, v_{i_2}) \in \boldsymbol{E}_S$ mit $h((v_{i_1}, v_{i_2})) \leqq p$, wobei p eine gegebene natürliche Zahl ist.

Eine derartige p-einfache Zerlegung existiert natürlich immer, wenn die Zahl p nur hinreichend groß gewählt wird. Derartige triviale Zerlegungen sind hier nicht von Interesse. Gesucht ist eine p-einfache Zerlegung Z mit der Eigenschaft, daß jede Teilgraphenknotenmenge nicht mehr als M Knoten enthält. Eine solche Zerlegung soll mit dem kleinstmöglichen p erzeugt werden.

Gemäß der Vereinbarung ist ein Strukturgraph ein vollständiger Graph. Dadurch muß auch jeder Teilgraph $z_k \in \boldsymbol{Z}$ ein vollständiger Teilgraph sein, wenn aus der Kantenmenge von G_S nur die Kanten entfernt werden, die z_k mit dem Restgraphen $G_S - z_k$ verbinden.

Aus der Menge $\boldsymbol{V}_S$ werden k Knoten zu einer Menge $\boldsymbol{V}_S^1$ zusammengefaßt. Jeder Knoten der Menge $\boldsymbol{V}_S^1$ inzidiert wegen der Vollständigkeit von G_S mit $m - 1$ Kanten. Werden $k(m - k)$ Kanten aus G_S entfernt, von denen jeweils $m - k$ Kanten mit einem der k Knoten der Menge $\boldsymbol{V}_S^1$ inzidieren, zerfällt G_S in zwei Teilgraphen z_1 und z_2. Der Teilgraph z_1 enthält k Knoten und $(k(k - 1))/2$ Kanten, und der Teilgraph z_2 enthält $m - k$ Knoten sowie $((m - k)(m - k - 1))/2$ Kanten.

Somit erhält man: Falls es in der Menge $\boldsymbol{V}_S$ k Knoten gibt, die mit jeweils $m - k$ Kanten mit einem Kantengewicht $\leqq p$ inzi-

---

[1]) Vortrag anläßlich der 10. Jahrestagung „Grundlagen der Modellierung und Simulation" (8. bis 10. Dezember 1981) in Rostock.
Mitteilung aus dem Zentralinstitut für Kybernetik und Informationsprozesse der AdW der DDR.

dieren, so gibt es eine p-einfache Zerlegung $\boldsymbol{Z} = \{z_1, z_2\}$ von G_S. Allgemeiner kann man sagen: Wenn in G_S mindestens

$$(k_1(m - k_1) + k_2(m - k_2) + \dots + k_l(m - k_l))/2 \text{ Kanten} \quad (8)$$

mit einem Kantengewicht $\leqq p$ existieren und k_1 Knoten mit jeweils $m - k_1$ dieser Kanten, ..., k_l Knoten mit jeweils $m - k_l$ dieser Kanten inzidieren, so gibt es eine p-einfache Zerlegung $\boldsymbol{Z} = \{z_1, \dots, z_l\}$ des Strukturgraphen G_S.

Mit Hilfe dieser Aussage kann ein Verfahren zur Erzeugung einer p-einfachen Zerlegung angegeben werden.

Sei $\boldsymbol{H}$ eine (m, m)-Matrix mit

$$h_{i_1 i_2} := \begin{cases} h((v_{i_1}, v_{i_2})), & \text{wenn} \quad i_1 \neq i_2 \\ 0, & \text{sonst} . \end{cases} \quad (9)$$

$\boldsymbol{H}$ ist eine symmetrische Matrix.

Das Verfahren arbeitet dann folgendermaßen:

Man setzt $p = 1$. Sodann wird bestimmt: $h^* = \min\limits_{i_1 i_2} h_{i_1 i_2}$. Wenn gilt, daß $h^* \leqq p$, wird die Menge ermittelt:

$$\boldsymbol{R} := \{h_{i_1 i_2} \in \boldsymbol{H} \mid h_{i_1 i_2} = h^*\} .$$

Man benötigt für jede Kante mit einem Gewicht > 0 einen charakteristischen Vektor. Sei $(v_{i_1}, v_{i_2}) \in \boldsymbol{E}_S$ und $h((v_{i_1}, v_{i_2})) > 0$, dann wird

$$k_{i_1, i_2} = (k^1_{i_1, i_2}, \dots, k^n_{i_1, i_2}) := (k_{i_1 1} \cdot k_{i_2 1}, \dots, k_{i_1 n} \cdot k_{i_2 n}) . \quad (10)$$

Ein ausgezeichneter charakteristischer Vektor ist der Vektor

$$\boldsymbol{k}^* = (k^*_1, \dots, k^*_n) := \left(\bigvee_{h_{i_1 i_2} \in \boldsymbol{R}} k^1_{i_1, i_2}, \dots, \bigvee_{h_{i_1 i_2} \in \boldsymbol{R}} k^n_{i_1, i_2} \right) . \quad (11)$$

Jetzt kann nach der folgenden Vorschrift eine Matrix $\boldsymbol{H}^1$ berechnet werden:

$$h^1_{i_1 i_2} := h_{i_1 i_2} - \boldsymbol{h}^* \sum_{j=1}^{n} \bar{k}_j , \quad (12)$$

wobei $\bar{k}_j := k^*_j \cdot k^j_{i_1, i_2}$.

Wenn der Graph G_S nur einfache Kanten enthält, vereinfacht sich die Vorschrift (12). Es soll dann gelten

$$h^1_{i_1 i_2} := \begin{cases} 0, & \text{wenn} \quad h_{i_1 i_2} \in \boldsymbol{R} , \\ h_{i_1 i_2} , & \text{sonst} . \end{cases}$$

Man bildet einen reduzierten Strukturgraphen G^1_S aus G_S, indem man für alle Kanten aus G_S mit einem Gewicht > 0 das neue Kantengewicht $h^1((v_{i_1}, v_{i_2})) := h^1_{i_1 i_2}$ einsetzt.

Die mit einem Kantengewicht Null versehenen Kanten des reduzierten Graphen werden als aus der Kantenmenge $\boldsymbol{E}_S$ des Graphen G_S entfernte Kanten betrachtet.

Die Anzahl der Kanten mit dem Gewicht Null in G^1_S, die mit einem Knoten $v_{i_1} \in \boldsymbol{V}_S$ inzidieren, ist die Anzahl der Nullen in der i_1-ten Zeile der Matrix $\boldsymbol{H}^1$ minus 1. Demzufolge ist die Gesamtzahl der Kanten mit dem Gewicht Null im reduzierten Graphen: (Anzahl der Nullelemente der Matrix $\boldsymbol{H}^1 - m)/2$.

Um zu erfahren, ob man durch die oben angegebenen Operationen eine p-einfache Zerlegung erhalten hat, muß man die Zahl der Nullelemente der Matrix $\boldsymbol{H}^1$ nach der oben angegebenen Regel (8) auswerten.

Wenn keine Zerlegung $\boldsymbol{Z}$ entstanden ist, wird die Zahl p um 1 erhöht und erneut begonnen.

Hat man eine Zerlegung $\boldsymbol{Z}$ erhalten, so muß man kontrollieren, ob jede Teilgraphenknotenmenge nicht mehr als M Knoten enthält. Wenn diese Bedingung erfüllt ist, ist die Zerlegung $\boldsymbol{Z}$ zulässig. Im anderen Fall muß p erhöht und das Verfahren erneut durchlaufen werden.

3. Strukturnetzwerk

Es sei nun $\boldsymbol{Z} = \{z_1, \dots, z_l\}$ eine p-einfache Zerlegung eines Strukturgraphen $G_S = (\boldsymbol{V}_S, \boldsymbol{E}_S, h)$.

Jeder Komponente $z_k \in \boldsymbol{Z}$ $(k = 1, \dots, l)$ wird ein charakteristischer Vektor $\boldsymbol{K}^0(z_k) = (K^0_1(z_k), \dots, K^0_n(z_k))$ durch die Festlegung

$$K^0_j(z_k) := \begin{cases} 1, \text{ wenn es eine Kante } (v_{i_1}, v_{i_2}) \in \boldsymbol{E}_S \\ \text{gibt mit } k^j_{i_1, i_2} = 1,\ v_{i_1} \in z_k,\ v_{i_2} \notin z_k , \\ 0, \quad \text{sonst} , \end{cases} \quad (13)$$

zugewiesen.

Ein durch $\boldsymbol{Z}$ induziertes Netzwerk ist $N = (\boldsymbol{Z}, \boldsymbol{C}, H_1, H_2)$, wobei gilt:

1) $\boldsymbol{Z}$ ist die Knotenmenge.
2) $\boldsymbol{C} \subset \binom{\boldsymbol{Z}}{2}$ ist die Kantenmenge. Zwischen zwei Knoten z_{k_1} z_{k_2} $(k_1 \neq k_2)$ existiert eine Kante (z_{k_1}, z_{k_2}) genau dann, wenn $v_{i_1} \in z_{k_1}$ und $v_{i_2} \in z_{k_2}$ existieren und $(v_{i_1}, v_{i_2}) \in \boldsymbol{E}_S$ mit $h((v_{i_1}, v_{i_2})) > 0$.
3) $H_1 \colon Z \to |N$ ist die Knotengewichtsfunktion.
   $H_1(z_k) := |\boldsymbol{V}^k_S|$ für jedes $k = 1, \dots, l$.
4) $H_2 \colon C \to |N$ ist die Kantengewichtsfunktion.
   $$H_2((z_{k_1}, z_{k_2})) := \sum_{i=1}^{n} K^1_i((z_{k_1}, z_{k_2})) ,$$
   mit $K^1((z_{k_1}, z_{k_2}))$ ist der charakteristische Vektor der Kante (z_{k_1}, z_{k_2}) bezeichnet, der folgendermaßen definiert ist:
   $$K^1((z_{k_1}, z_{k_2})) := K^0(z_{k_1}) \cdot K^0(z_{k_2}) = (K^0_1(z_{k_1}) \cdot K^0_1(z_{k_2}), \dots) . \quad (14)$$

Zum besseren Verständnis sei daran erinnert, daß jedem Knoten des Netzwerkes eine wohldefinierte Teilmenge der Funktionenmenge $\{f_1, \dots, f_m\}$ entspricht. Das Knotengewicht ist demzufolge gleich der Anzahl der Funktionen in der zu dem Knoten gehörigen Funktionenmenge. Der charakteristische Vektor $\boldsymbol{K}^0(z_k)$ gibt an, welche Variablen der zu z_k gehörenden Funktionenmenge auch in zu anderen Knoten gehörenden Funktionenteilmengen auftreten. Der charakteristische Vektor einer Kante (z_{k_1}, z_{k_2}) gibt an, welche Variablen in den beiden zugehörigen Funktionenmengen gleichzeitig vorkommen. Das Kantengewicht gibt die Anzahl dieser gemeinsamen Variablen an.

Eine Teilmenge $\boldsymbol{z} \subset \boldsymbol{Z}$ soll (H_1, M)-zulässig genannt werden, genau dann, wenn gilt: $\sum\limits_{z_k \in \boldsymbol{z}} H_1(z_k) \leqq M$, oder anders ausgedrückt: $\boldsymbol{z}$ ist zulässig, wenn in der zu $\boldsymbol{z}$ gehörenden Funktionenmenge nicht mehr als M Funktionen enthalten sind.

Es soll $\boldsymbol{Z}_N = \{Z_1, \dots, Z_s\}$ eine Zerlegung des Netzwerkes N genannt werden, wenn gilt:

$$\left.\begin{array}{l} 1)\ \emptyset \notin \boldsymbol{Z}_N , \\ 2)\ \bigcup\limits_{\boldsymbol{Z}_r \in \boldsymbol{Z}_n} \boldsymbol{Z}_r = \boldsymbol{Z}_N , \\ 3)\ \text{Für jedes Paar } \boldsymbol{Z}_r, \boldsymbol{Z}_t \in \boldsymbol{Z}_N,\ r \neq t, \text{ gilt: } \boldsymbol{Z}_r \cap \boldsymbol{Z}_t = \emptyset . \end{array}\right\} \quad (15)$$

Eine Zerlegung $\boldsymbol{Z}_N$ ist eine zulässige Zerlegung, wenn alle Komponenten $\boldsymbol{Z}_r$ $(r = 1, \dots, s)$ zulässige Mengen sind.

Bekanntlich heißen zwei Knoten benachbart, wenn sie durch eine Kante verbunden sind. Zwei benachbarte Knoten des Netzwerkes sollen zulässig benachbart heißen, wenn die Vereinigung dieser beiden Knoten eine zulässige Menge ist. Entsprechend sollen zwei Teilmengen von $\boldsymbol{z}$ zulässig benachbart heißen, falls sie durch eine oder mehrere Kanten miteinander verbunden sind und ihre Vereinigung eine zulässige Menge ist.

Der Wert einer Zerlegung $\boldsymbol{Z}_N$ wird definiert als:

$$W(\boldsymbol{Z}_N) := \sum_{i=1}^{n} \bigvee_{\boldsymbol{Z}_r \in \boldsymbol{Z}_N} \bigvee_{\substack{z_{k_1} \in \boldsymbol{Z}_r \\ z_{k_2} \in \boldsymbol{Z}_N - \boldsymbol{Z}_r}} K^1_i((z_{k_1}, z_{k_2})) . \quad (16)$$

Jeder Komponente $\boldsymbol{Z}_r$ der Zerlegung des Netzwerkes entspricht eine gewisse Teilmenge der Menge $\{f_1, \dots, f_m\}$. Darum kann man auch sagen: Der Wert einer Zerlegung ist die Anzahl der Variablen, die in zwei oder mehreren Funktionenteilmengen auftreten. Solche Variablen sollen im weiteren Kopplungsvariable genannt werden.

Eine zulässige Zerlegung $\boldsymbol{Z}^*_N$ heißt eine optimale Zerlegung genau dann, wenn gilt:

$$W(\boldsymbol{Z}_N) \geqq W(\boldsymbol{Z}^*_N) \quad \text{für jede zulässige Zerlegung } \boldsymbol{Z}_N .$$

Eine Kante des Netzwerkes soll eine Kopplung bei einer Zerlegung $\boldsymbol{Z}_N$ genannt werden, wenn ihre Endknoten in zwei verschiedenen Komponenten der Zerlegung enthalten sind.

Unter gewissen Voraussetzungen ist es möglich, ein Strukturnetzwerk N zu vereinfachen.

Angenommen, es gibt einen Knoten in dem betrachteten Netzwerk, der keinen zulässigen Nachbarn hat. Dann muß dieser Knoten als Komponente in jeder zulässigen Zerlegung vorkommen. Alle mit diesem Knoten inzidenten Kanten sind darum bei jeder zulässigen Zerlegung Kopplungen. Deshalb kann man sowohl den Knoten als auch alle mit ihm inzidenten Kanten bei den weiteren Überlegungen unberücksichtigt lassen.

Wenn zwei benachbarte Knoten des Netzwerkes keine zulässige Menge bilden, muß ihre Verbindungskante in jeder zulässigen Zerlegung als Kopplung auftreten. Aus diesem Grund kann man derartige Kanten im weiteren außer Betracht lassen.

Im allgemeinen bewirken die oben genannten Vereinfachungen auch noch Veränderungen bei den charakteristischen Vektoren der verbleibenden Kanten. Darauf soll hier nicht näher eingegangen werden.

4. Optimale Zerlegung des Strukturnetzwerkes

Die Teilmenge $\boldsymbol{z} \subset \boldsymbol{Z}$ sei eine zulässige Menge. Man ordnet der Teilmenge $\boldsymbol{z}$ eine Kopplungszahl $H_{22}(\boldsymbol{z})$ durch die folgende Vorschrift zu:

$$H_{22}(\boldsymbol{z}) := \sum_{i=1}^{n} \bigvee_{z_{k_1} \in \boldsymbol{Z},\, z_{k_2} \in \boldsymbol{Z}-\boldsymbol{z}} K_i^1(z_{k_1}, z_{k_2})) \,. \tag{17}$$

Die Kopplungszahl $H_{22}(\boldsymbol{z})$ ist gleich der Anzahl der Kopplungsvariablen in der durch $\boldsymbol{z}$ repräsentierten Funktionenmenge. Der Knoten z_k sei ein zulässiger Nachbar der Teilmenge $\boldsymbol{z}$. Man sagt, der Knoten z_k ist mit der Menge $\boldsymbol{z}$ stark benachbart, genau dann, wenn gilt:

1) $H_{22}(\boldsymbol{z} \cup \{z_k\}) \leqq H_{22}(\boldsymbol{z})$,
2) Es gibt in der Menge der zulässigen Nachbarn von $\boldsymbol{z}$ keinen Knoten z_{k_1}, so daß gilt:

$$H_{22}(\boldsymbol{z} \cup \{z_{k_1}\}) < H_{22}(\boldsymbol{z} \cup \{z_k\}) \,. \tag{18}$$

Die Zahl

$$H_{21}^{z}(z_k) := \sum_{i=1}^{n} \bigvee_{z_{k_1} \in \boldsymbol{z}} K_i^1((z_k, z_{k_1})) - \overline{H_{21}^{\boldsymbol{z}}(z_k)} \tag{19}$$

bezeichnet man als Zusammenhangszahl des Knotens z_k mit der Menge $\boldsymbol{z}$. Der Korrekturterm $\overline{H_{21}^{\boldsymbol{z}}}$ ist dabei wie folgt definiert:

$$\overline{H_{21}^{\boldsymbol{z}}(z_k)} := \begin{cases} \displaystyle\sum_{i=1}^{n} \bigvee_{z_{k_1} \in \boldsymbol{z}} K_i^1((z_k, z_{k_1})) \cdot \bigvee_{\substack{z_{k_1} \in \boldsymbol{z} \\ z_{k_2} \neq z_k,\, z_{k_2} \text{ Nachbar} \\ \text{von } z_{k_1},\, z_{k_2} \in z}} K_i^1((z_{k_1}, z_{k_2})) \,, \\ \text{wenn } z_k \text{ in einem geschlossenen Kantenzug der Länge 3 enthalten ist.} \\ 0, \quad \text{sonst} \,. \end{cases} \tag{20}$$

Die Zusammenhangszahl gibt an, wieviele der Kopplungsvariable der durch den Knoten z_k dargestellten Funktionenmenge gleichzeitig nur noch als Kopplungsvariable der durch die Menge $\boldsymbol{z}$ repräsentierten Funktionenmenge auftreten.

Wenn man zu einer zulässigen Teilmenge $\boldsymbol{z} \subset \boldsymbol{Z}$ einen zulässigen Nachbarknoten z_k hinzufügt, berechnet sich die Kopplungszahl der neuen Teilmenge $\boldsymbol{z} \cup \{z_k\}$ nach der Vorschrift:

$$H_{22}(\boldsymbol{z} \cup \{z_k\}) = H_{22}(\boldsymbol{z}) - H_{21}^{\boldsymbol{z}}(z_k) + H_{21}^{\boldsymbol{Z}-\boldsymbol{z}}(z_k) \,.$$

Man ist nun in der Lage, ein Kriterium anzugeben, wann ein Knoten mit einer Menge stark benachbart ist. Es gilt: Ein zulässiger Nachbar z_k einer Menge $\boldsymbol{z}$ ist mit dieser Menge stark benachbart genau dann, wenn gilt:

$$\left.\begin{array}{l} 1)\ H_{21}^{\boldsymbol{z}}(z_k) - H_{21}^{\boldsymbol{Z}-\boldsymbol{z}}(z_k) \geqq 0, \\ 2)\ H_{21}^{\boldsymbol{z}}(z_k) - H_{21}^{\boldsymbol{Z}-\boldsymbol{z}}(z_k) \geqq H_{21}^{\boldsymbol{z}}(z_{k_1}) - H_{21}^{\boldsymbol{Z}-\boldsymbol{z}}(z_{k_1}) \end{array}\right\} \tag{21}$$

für jeden zulässigen Nachbarn z_{k_1} von $\boldsymbol{z}$.

Eine zulässige Teilmenge $\boldsymbol{z} \subset \boldsymbol{Z}$ wird als eine lokal minimale Menge genau dann bezeichnet, wenn kein zulässiger Nachbar von $\boldsymbol{z}$ existiert, der mit $\boldsymbol{z}$ stark benachbart ist, und wenn für jeden Knoten z_k der Menge $\boldsymbol{z}$ gilt:

$$H_{22}(\boldsymbol{z} - \{z_k\}) \geqq H_{22}(\boldsymbol{z}) \,. \tag{22}$$

Mit anderen Worten: Die Knotenmenge $\boldsymbol{z}$ ist lokal minimal genau dann, wenn durch Hinzufügen einer Funktion zur durch $\boldsymbol{z}$ repräsentierten Funktionenmenge oder durch Entfernen einer Funktion aus der durch $\boldsymbol{z}$ repräsentierten Funktionenmenge die Zahl der Kopplungsvariablen der entsprechenden Funktionenmengen größer ist als die der durch $\boldsymbol{z}$ repräsentierten Funktionenmenge. Es sei $\boldsymbol{Z}_N = \{\boldsymbol{Z}_1, \ldots, \boldsymbol{Z}_s\}$ eine zulässige Zerlegung. Dann sollen zwei Komponenten $\boldsymbol{Z}_r, \boldsymbol{Z}_t \in \boldsymbol{Z}_N$ stark benachbart genannt werden, genau dann, wenn keine Komponente $\boldsymbol{Z}_u \in \boldsymbol{Z}_N$ existiert, die der Ungleichung: $H_{22}(\boldsymbol{Z}_r \cup \boldsymbol{Z}_u) < H_{22}(\boldsymbol{Z}_r \cup \boldsymbol{Z}_t)$ genügt, wobei $\boldsymbol{Z}_r \cup \boldsymbol{Z}_u$ und $\boldsymbol{Z}_r \cup \boldsymbol{Z}_t$ zulässige Mengen sind.

Eine Komponente $\boldsymbol{Z}_r \in \boldsymbol{Z}_N$ wird eine global minimale Menge genau dann genannt, wenn gilt:

1) Es gibt keine Komponente $\boldsymbol{Z}_t \in \boldsymbol{Z}_N$, so daß $\boldsymbol{Z}_r \cup \boldsymbol{Z}_t$ eine zulässige Menge ist.
2) $\boldsymbol{Z}_r$ ist die Vereinigung von disjunkten lokal minimalen Mengen, die miteinander stark benachbart sind.

Eine notwendige und hinreichende Bedingung für die Optimalität einer Zerlegung $\boldsymbol{Z}_N^*$ gibt der folgende Satz:

Eine zulässige Zerlegung $\boldsymbol{Z}_N^*$ ist eine optimale Zerlegung genau dann, wenn jede Komponente der Zerlegung eine global minimale Menge ist.

Um eine optimale Zerlegung des Netzwerkes zu bekommen, ist es also erforderlich, die Knoten des Netzwerkes zu disjunkten global minimalen Mengen zusammenzufassen. Das kann etwa in der folgenden Weise geschehen:

In einem ersten Schritt müssen die Knoten zu lokal minimalen Mengen zusammengefaßt werden. Hierbei kann man so vorgehen, daß man, ausgehend von einem Knoten z_k, feststellt, welcher der zulässigen Nachbarn mit z_k stark benachbart ist. Falls ein solcher Nachbar existiert, faßt man ihn mit z_k zusammen. Wenn die neu entstandene Menge zulässige Nachbarn hat, untersucht man wiederum, ob einer der zulässigen Nachbarn mit der Menge stark benachbart ist usw.

Gibt es keinen zulässigen Nachbarn mehr, oder gibt es unter den zulässigen Nachbarn keinen Knoten, der mit der im Aufbau befindlichen Menge stark benachbart ist, hat man eine lokal minimale Menge erhalten. Danach betrachtet man einen Knoten des Netzwerkes, der noch nicht in einer lokal minimalen Menge enthalten ist, und wiederholt die obige Prozedur. Als Ergebnis erhält man eine zulässige Zerlegung $\boldsymbol{Z}_N$, bei der jede Komponente eine lokal minimale Menge ist. Falls man keine Komponenten mehr zusammenfassen darf, ist die Zerlegung schon optimal. Ansonsten müssen in analoger Vorgehensweise wie oben die Komponenten zu global minimalen Mengen zusammengefaßt werden. Dadurch erzeugt man eine optimale Zerlegung $\boldsymbol{Z}_N^* = \{\boldsymbol{Z}_1^*, \ldots, \boldsymbol{Z}_s^*\}$.

Jeder Komponente $\boldsymbol{Z}_r^* \in \boldsymbol{Z}_N^*$ entspricht eine Menge von Funktionen $\{f_{r_1}, \ldots, f_{r_{n_r}}\}$, d. h., das Teilsystem S_r wird beschrieben durch

$$\begin{pmatrix} y_{r_1} \\ \vdots \\ y_{r_{n_r}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_{r_1}(x) \\ \vdots \\ f_{r_{n_r}}(x) \end{pmatrix}.$$

Die Zahl der Kopplungsvariablen zwischen den Teilsystemen ist minimal.

Literatur

[1] *Busacker, R. G.; Saaty, T. L.:* Endliche Graphen und Netzwerke. München/Wien: R. Oldenbourg Verlag 1968.
[2] *Deo, N.:* Graph Theory with Applications to Engineering and Computer Science, Englewood Cliffs, N.J. 1974.
[3] *Lovasz, L.:* On decomposition of graphs. Studia Scientiarum Mathematicarum Hungarica 1 (1966) S. 237–238.
[4] *Nieminen, J.:* On minimally interconnected subnetworks of a network. Control and Cybernetics 9 (1980), No. 1–2, pp. 47–52.
[5] *Debowy, J.:* An algorithm for optimal partitioning of a graph. Zastosowania matematyki. 16 (1977) No. 1, pp. 63–71. msr 7485

Dr.-Ing. *U. Bendel*, Berlin[1])

Dynamisches Herzkammermodell auf der Grundlage des Modells eines gekrümmten Muskels

IA 1.1.

0. Einleitung

Die theoretische Durchdringung des Herz-Kreislauf-Systems, das ja ein dynamisches System in ganz besonderem Grade ist, stellt eine wichtige Aufgabe der medizinischen Grundlagenforschung dar, da die Herz-Kreislauf-Erkrankungen in allen Industrieländern ein erhebliches Ausmaß angenommen haben. Ein wichtiges Teilsystem bildet das Herz, das durch die Kammerkontraktionen den Blutstrom erzeugt. Somit setzt eine mathematisch-systemtheoretische Analyse des Herz-Kreislauf-Systems eine gute mathematisch-systemtheoretische Beschreibung der Mechanik der Herzkammer voraus. Dabei wird keine Beschreibung einzelner Funktionen bzw. Bewegungsfolgen im Sinne einer Approximation dieser Verläufe angestrebt, z. B. [1] bis [6], sondern der mathematisch-systemtheoretische Aufbau eines Kammermodells aus Muskelelementen nach den strukturellen Gegebenheiten (natürlich in vereinfachter Form) vorgenommen. Besonderes Gewicht wird der Dynamik der Wandbewegung beigemessen, wobei infolge des linearisierten Ansatzes die nichtlinearen statischen Innendruck-Wandspannung-Beziehungen, die oft allein das Modell sind [7] bis [12], nicht verwendet werden.

1. Problemstellung

Das Herz besteht aus 2 Vorkammern und 2 Herzkammern (Ventrikel), wobei die Wandmuskulatur des linken Ventrikels besonders stark ausgebildet ist, da er infolge der Versorgung des Körperkreislaufs die größten Strömungswiderstände im Gegensatz zum Lungenkreislauf zu überwinden hat (Bild 1). Das Herz besteht somit aus 4 über Strömungswiderstände miteinander verbundenen Kammern, die koordiniert elektrisch zu Kontraktionen (Pumpfunktion) veranlaßt werden. Das Grundelement des Herzens — die Kammer — ist ein Hohlmuskel, d. h. eine gekrümmte muskuläre Wand, mit einer Bluteintritts- und Blutaustrittsöffnung, die durch Klappen passiv verschlossen werden können (je nach den inneren oder äußeren Druckverhältnissen). Die Wand besteht aus mehreren spiralförmig angeordneten, sich entgegengesetzt überdeckenden Herzmuskelfaserzügen (Myokard) (Bild 2), wobei die Muskelzellen ein dichtes Netz (Synzytium) bilden (Bild 3).

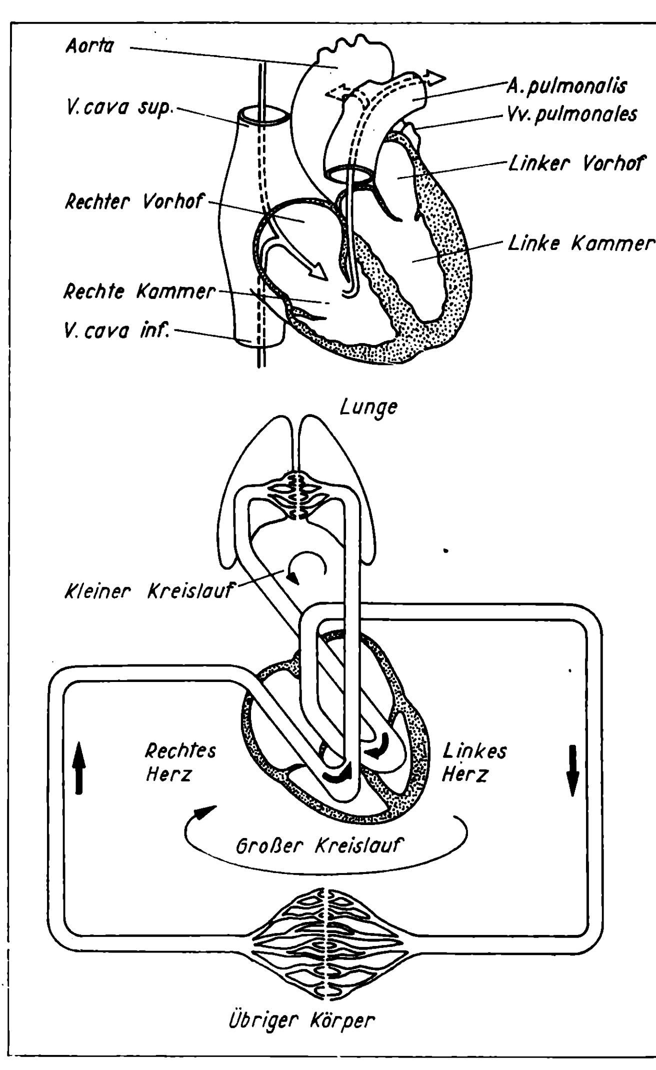


Bild 1. Das Kreislaufsystem [13]
Oben: Frontalansicht des eröffneten Herzens und der großen angeschlossenen Gefäße; unten: Schematische Darstellung der Verbindung der beiden Herzhälften mit dem kleinen und großen Kreislauf

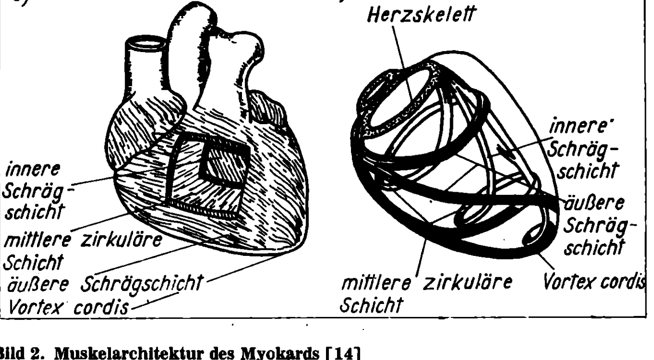


Bild 2. Muskelarchitektur des Myokards [14]
a) Schichtenaufbau der Kammerwand; b) Spiralzüge der Muskelfasern (Schema nach *Benninghoff*)

Der kontraktile Apparat in den Zellen, d. h. die Myosin-Aktin-Komplexe, sind analog dem Skelettmuskel strukturiert (quergestreifte Muskulatur). Diese Aktin-Myosin-Komplexe bestehen aus aneinandergereihten Sarkomeren, wobei mehrere parallel in Fibrillen angeordnet sind. Die elektrische Erregung der Muskulatur, die über die elektromechanische Ankopplung (Einstrom und Freisetzung von Ca^{++}-Ionen in das Zellinnere) die Krafterzeugung zwischen den Myosin-Aktin-Molekülen auslöst, breitet sich frontartig von einer Stelle beginnend über die gesamte Wand (von Zelle zu Zelle über die Tight Junctions) und auch in die Tiefe der Wand aus. Somit werden die einzelnen Zellen nacheinander zur Kontraktion veranlaßt.

Aus dieser kurzen Funktionsbeschreibung ist ersichtlich, daß die Grundelemente der Kammer die Muskelzelle und in ihr die

---

[1]) Vortrag anläßlich der 10. Jahrestagung „Grundlagen der Modellierung und Simulation" (8. bis 10. Dezember 1981) in Rostock.
Mitteilung aus der Herz-Kreislauf-Abteilung des Physiologischen Instituts des Bereiches Medizin (Charité) der Humboldt-Universität zu Berlin.

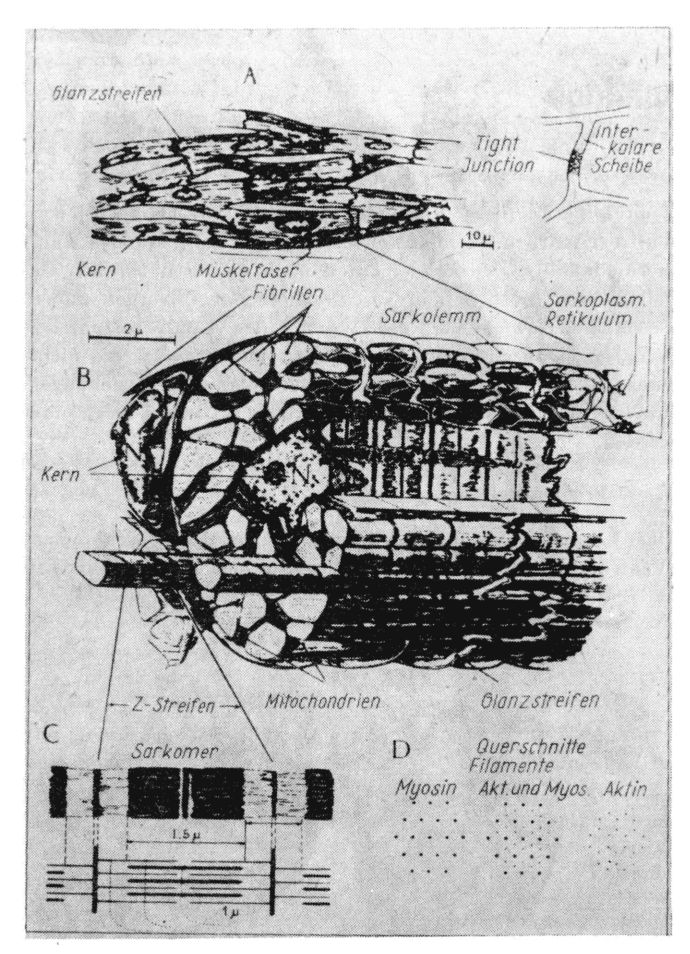


Bild 3. Struktur der Arbeitsmuskulatur des Herzens [15]

A) links: Synzytiale (netzartige) Struktur der Muskulatur; rechts: Glanzstreifen mit Tight Junction (Überleitungsstelle der elektrischen Erregung); B) Aufbau einer Muskelfaser aus parallel liegenden Fibrillen; C) Aufbau der Fibrillen aus Sarkomeren und Filamenten (Aktin-, Myosin-Moleküle); D) Querschnitte durch ein Sarkomer

Sarkomeren sind. Daher erscheint es sinnvoll, ein Kammermodell auf der Basis eines Modells des Sarkomer und dann weiter einer gekrümmten Muskelzelle bzw. eines Muskels (mehrere Zellen) aufzubauen.

2. Beschreibung eines Sarkomer (Muskelstück)

Wie aus Bild 3B ersichtlich ist, liegen innerhalb einer Zelle mehrere Fibrillen mit ihren Sarkomerabschnitten parallel. Es ist daher sinnvoll, die parallel liegenden Fibrillen von der Länge eines Sarkomerabschnitts zu einem Muskelstück zusammenzufassen. Bild 4a zeigt die zu betrachtende Struktur, und Bild 4b erläutert die für die Mechanik interessierenden Größen. Es sind die passiven Kräfte Kp, die aktive, durch Ca^{++}-Ionen ausgelöste kontraktile Kraft K_c, die resultierenden Seitenkräfte K und die Wege x_c zu beiden Seiten. Alle diese Größen sind zeitabhängig, und die Beziehungen zwischen ihnen ergeben das mechanische Modell dieses Muskelstücks. Unter der Voraussetzung kleiner Kräfte und Wege kann ein allgemeiner linearer Zusammenhang angenommen werden ([16] und besonders ausführlich [17]), der sofort in laplacetransformierter Form

$$\boldsymbol{L}\{K(t)\} = K(p)\,, \qquad \boldsymbol{L}\{x_c(t)\} = x_c(p) \tag{1}$$

und mit Hilfe der Übertragungsfunktionen $F_i(p)$

$$x_{c_2}(p) = F_1(p) \cdot x_{c_1}(p) - F_2(p) \cdot Kp_2(p)\,, \tag{2a}$$

$$Kp_1(p) = F_4(p) \cdot x_{c_1}(p) + F_1(p) \cdot Kp_2(p)\,, \tag{2b}$$

für $K_c = 0$ angegeben werden kann. Mit der Kräftebilanz [17]

$$K_1 = Kp_1 - K_c\,, \qquad K_2 = Kp_2 - K_c \tag{3}$$

und den aus der Symmetrie des Muskelstücks folgenden Beziehungen [17]

$$F_3 = F_1\,, \qquad F_4 = \frac{1 - F_1^2}{F_2}\,, \tag{4}$$

erhält man das isotonische Muskelstücksystem (Bild 4c)

$$x_{c_2} = F_1 \cdot x_{c_1} - F_2 \cdot K_2 - F_2 \cdot K_c\,, \tag{5a}$$

$$K_1 = \frac{1 - F_1^2}{F_2} \cdot x_{c_1} + F_1 \cdot K_2 - (1 - F_1) \cdot K_c\,. \tag{5b}$$

Ein konkretes Muskelstückmodell, d. h. die Angabe der Struktur der F_1 und F_2, kann aus physiologischen Muskelexperimenten ermittelt werden ([16] und [18] und ausführliche Ableitung in [17]). Mit dieser Kenntnis können alle Bewegungsformen für kleine Kräfte und Wege des Muskelstücks berechnet werden. Transformiert man die Gl. (5) in den Zeitbereich und setzt die physiologischen Nichtlinearitäten (Ruhe-Dehnungs-Kurve und Längen-Spannungs-Diagramm ([16] oder ein beliebiges Buch der Physiologie, z. B. [13] und [19])) in das Differentialgleichungssystem ein, können beliebige Bewegungsformen errechnet werden. Vorgegeben werden müssen zwei Größen für K und x_c (Bewegungsform) sowie der Kraftverlauf K_c, der in erster Näherung sprungförmig angenommen werden kann.

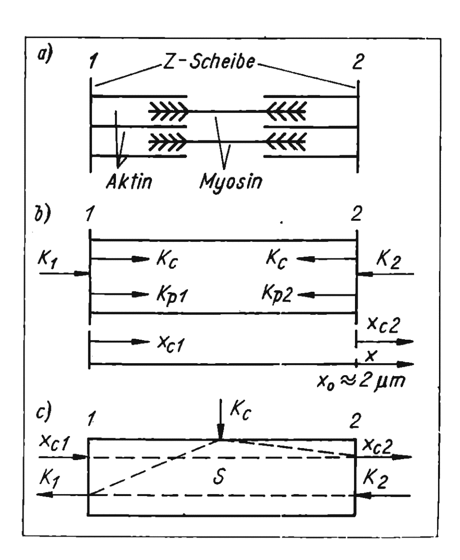


Bild 4. Interessierende mechanische Größen des Muskelstücks

a) Reales Muskelstück; b) Schematisches Muskelstück; c) Isotonisches Muskelstücksystem

3. Beschreibung eines langgestreckten Muskels

In der Muskelzelle sind eine Vielzahl von Muskelstücken in Reihe angeordnet (Bilder 3 B, C). Eine Aneinanderreihung von isotonischen Muskelstücksystemen nach Bild 4c bzw. Gln. (5) ist im Bild 5 dargestellt, und die Gleichungen bezüglich des Gesamtsystems sind

$$x_{c_{n+1}} = A_{n+1} \cdot x_{c_1} - B_{n+1} \cdot K_{n+1} - \sum_{j=1}^{n} E_{n+1,j} \cdot K_{cj}\,, \tag{6a}$$

$$K_1 = C_{n+1} \cdot x_{c_1} + A_{n+1} \cdot K_{n+1} + \sum_{j=1}^{n} G_{n+1,j} \cdot K_{cj}\,, \tag{6b}$$

mit

$$A_{n+1} = \prod_{i=1}^{n} \frac{F_{1i}}{\left(1 + \dfrac{1 - F_{1i}^2}{F_{2i}} \cdot B_i\right)}\,, \tag{6c}$$

$$B_{n+1} = F_{2n} + \cfrac{F_{1n}^2}{\cfrac{1 - F_{1n}^2}{F_{2n}} + \cfrac{1}{F_{2,n-1} + \cfrac{F_{1,n-1}^2}{\cfrac{1 - F_{1,n-1}^2}{F_{2,n-1}} + \cfrac{1}{\ddots\; \cfrac{1}{F_{2_1}}}}}} \tag{6d}$$

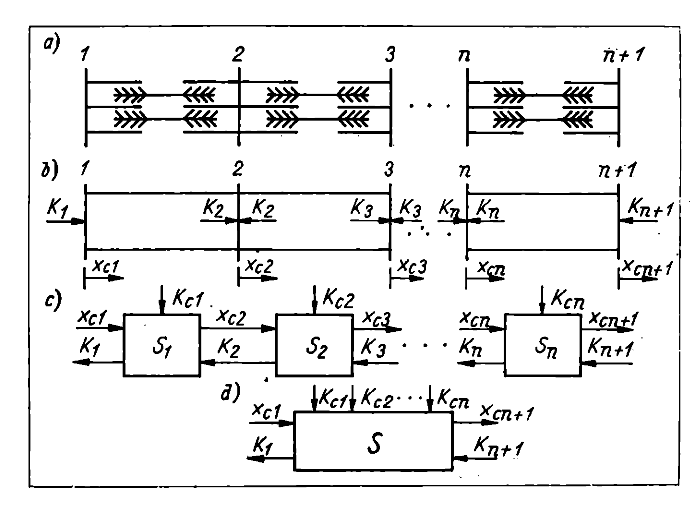


Bild 5. Aneinanderreihung von n Muskelstücken in bezug auf Bild 4

$$C_{n+1} = \frac{1 - F_{11}^2}{F_{21}} + \sum_{i=2}^{n} \left\{ \left[\prod_{j=1}^{i-1} \frac{F_{1j}}{1 + \frac{1 - F_{1j}^2}{F_{2j}} \cdot B_j} \right] \times \frac{1}{\frac{F_{2i}}{1 - F_{1i}^2} + B_i} \right\}, \tag{6e}$$

$$E_{n+1,j} = \left(F_{2j} + \frac{F_{1j}(F_{1j} - 1)}{\frac{1 - F_{1j}^2}{F_{2j}} + \frac{1}{B_j}} \right) \cdot \prod_{\nu=j+1}^{n} \frac{F_{1\nu}}{1 + \frac{1 - F_{1\nu}^2}{F_{2\nu}} \cdot B_\nu} \tag{6f}$$

$$G_{n+1,j} = \prod_{i=1}^{j-1} \frac{F_{1i}}{1 + \frac{1 - F_{1i}^2}{F_{2i}} \cdot B_i} \cdot \frac{(F_{1j} - 1)}{1 + \frac{1 - F_{1j}^2}{F_{2j}} \cdot B_j} - \sum_{\nu=j+1}^{n} \left[\prod_{i=1}^{\nu} \frac{F_{1i}}{1 + \frac{1 - F_{1i}^2}{F_{2i}} \cdot B_i} \cdot \frac{1}{\frac{F_{2\nu}}{1 - F_{1\nu}^2} + B_\nu} \times \left(F_{2j} + \frac{F_{1j}(F_{1j} - 1)}{\frac{1 - F_{1j}^2}{F_{2j}} + \frac{1}{B_j}} \right) \cdot \prod_{\varrho=j+1}^{\nu-1} \frac{F_{1\varrho}}{1 + \frac{1 - F_{1\varrho}^2}{F_{2\varrho}} \cdot B_\varrho} \right], \tag{6g}$$

mit

$$B_1 = 0\,, \qquad \prod_{\nu=n+1}^{n} (\ldots) = 1\,. \tag{6h}$$

Die Übertragungsfunktionen F_{1i}, F_{2i} $(i = 1, 2, \ldots, n)$ charakterisieren die Eigenschaften der Muskelstücke in der Zelle. Unterstellt man diesen n Muskelstücken gleiche Eigenschaften, was jedoch wegen der netzartigen Struktur der Zellen und somit ihrer unregelmäßigen Form wegen nicht zutrifft, d. h.

$$F_{1i} = F_1\,, \qquad F_{2i} = F_2\,, \qquad i = 1, 2, \ldots, n\,, \tag{7a}$$

erhält man eine homogene Zelle, für die infolge der Symmetrie wiederum

$$C_{n+1} = \frac{1 - A_{n+1}^2}{B_{n+1}} \tag{7b}$$

gilt.

Da die elektrische Erregung sich über die Tight Junctions von Zelle zu Zelle ausbreitet, kann man weiter vereinfachend davon ausgehen, daß alle Sarkomeren bzw. Muskelstücke in einer Zelle gleichzeitig und gleichartig erregt werden. Das bedeutet, daß

$$K_{c_1} = K_{c_2} = \ldots = K_{c_n} = K_c \tag{8a}$$

gilt, und es folgt

$$\sum_{j=1}^{n} E_{n+1,j} = B_{n+1}\,, \qquad \sum_{j=1}^{n} G_{n+1,j} = A_{n+1} - 1\,. \tag{8b}$$

Somit erhält man für die aus n Muskelstücken bestehende homogene, gleichartig und gleichzeitig erregte Zelle das isotonische System zu

$$x_{c_{n+1}} = A_{n+1} \cdot x_{c_1} - B_{n+1} \cdot K_{n+1} - B_{n+1} \cdot K_c\,, \tag{8c}$$

$$K_1 = \frac{1 - A_{n+1}^2}{B_{n+1}} \cdot x_{c_1} + A_{n+1} \cdot K_{n+1} - (1 - A_{n+1}) \cdot K_c\,. \tag{8d}$$

Schon der Vergleich der Gln. (5) und (8) weist auf ähnliche Eigenschaften hin, die man durch genauere Analyse der F_1 und A_{n+1} sowie der F_2 und B_{n+1} belegen kann.

Damit hat man für die Zelle eine einfache Beschreibungsform nach Gln. (5) und eine kompliziertere, aber die Realitäten genauer widerspiegelnde Beschreibungsform. Bedenkt man, daß die Zahl der Muskelstücke (Sarkomerabschnitte) innerhalb einer Zelle etwa $n \approx 40$ ist, so wird die Kompliziertheit der Gleichungen allein schon beim Kettenbruch Gl. (6d) deutlich.

Es ist daher sinnvoll, das Problem weiter zu vereinfachen und als Zellenmodell die Gln. (5) zu verwenden. Dann kann man jedoch die Gln. (6) als Modell einer Muskelfaser, bestehend aus n Zellen, benutzen. Diese Zuordnungen von Gleichung zu Struktur sollen nun weiterhin benutzt werden.

4. Beschreibung eines einschichtigen ringförmig gekrümmten Muskels

Die einfachste gekrümmte Form ist ein Ring. Krümmt man eine Muskelfaser zu einem Ring (Bild 6 a, b; ein derartiges Vorgehen wurde ebenfalls in [3] versucht), so hat man neben der einfachen mathematischen Behandlung den Vorteil, daß man sich die Seiten als Öffnungen für den Bluteinstrom und Blutausstrom denken kann. Natürlich stellt diese einfach ringförmig gekrümmte Muskelfaser eine starke Vereinfachung gegenüber der wahren räumlich gekrümmten und spiralförmig verlaufenden Muskelfaser (Bild 2b) dar.

Bei der Ableitung der Gleichungen ist es günstiger, statt der Kräfte K, die Spannungen σ zu verwenden, da beim Herzen die Wandspannung eine große Rolle spielt, d. h.

$$\sigma(p) = -\frac{K(p)}{d_0 \cdot l_0}\,, \qquad \sigma_c(p) = \frac{K_c(p)}{d_0 \cdot l_0}\,. \tag{9}$$

Das einfachste Vorgehen ist, eine Zelle zu krümmen, d. h. von den Gln. (5) auszugehen. Mit Gl. (9) lauten die Gln. (5)

$$x_{c_2} = F_1 \cdot x_{c_1} + F_2 \cdot d_0 \cdot l_0 \cdot \sigma_2 - F_2 \cdot d_0 \cdot l_0 \cdot \sigma_c\,, \tag{10a}$$

$$\sigma_1 = -\frac{1 - F_1^2}{d_0 \cdot l_0 \cdot F_2} \cdot x_{c_1} + F_1 \cdot \sigma_2 - (1 - F_1) \cdot \sigma_c\,. \tag{10b}$$

An der Zusammensetzstelle muß das Spannungsgleichgewicht

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma \tag{11}$$

gelten, und es folgen aus den Gln. (10)

$$x_{c_2} = -x_{c_1}\,, \tag{12a}$$

$$\sigma(p) = -\frac{1 + F_1(p)}{d_0 \cdot l_0 \cdot F_2(p)} \cdot x_{c_1}(p) + \sigma_c(p)\,. \tag{12b}$$

Die Gl. (12a) besagt, daß bei jeder Änderung oder Bewegung x_{c_1} auch eine Änderung oder Bewegung $x_{c_2} = -x_{c_1}$ erfolgt. Die Bewegungen sind somit symmetrisch zur Schnitt- oder Zusammensetzstelle. Dies ist eine Folge der angenommenen Struktursymmetrie der Zelle. Die Änderung der Länge der gestreckten Zelle oder des Umfanges der gekrümmten Zelle ist daher (Bild 6)

$$u(p) = x_{c_2}(p) - x_{c_1}(p) = -2x_{c_1}(p)\,, \tag{13}$$

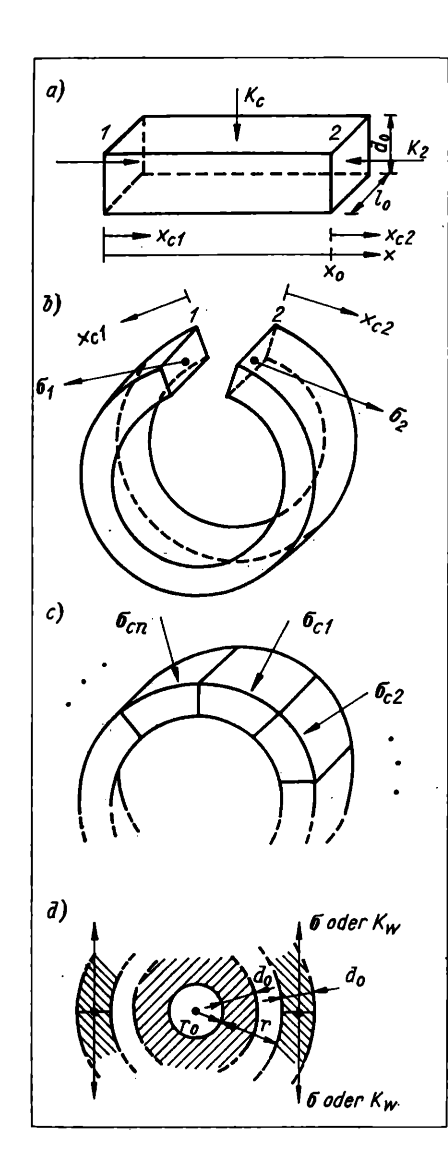


Bild 6. Krümmung eines Muskels zu einem Ring

a) Gestreckter Muskel; b) Darstellung der Krümmung; c) Erregungsmöglichkeiten eines aus n Zellen bestehenden Ringes; d) Interessierende Größen am Muskelring

und für Gl. (12b) folgt dann

$$\sigma(p) = \frac{1}{2} \cdot \frac{1 + F_1}{d_0 \cdot l_0 \cdot F_2(p)} \cdot u(p) + \sigma_c(p) . \tag{14}$$

Das ist eine Beziehung, die die Dynamik zwischen Wandspannung σ, kontraktiler, d. h. aktiver, Wandspannung σ_c und Umfangsänderung u beschreibt.

Krümmt man eine aus n Zellen bestehende Muskelfaser, d. h. geht man von den Gln. (6) aus, so folgen mit

$$\delta_{n+1}(p) = -\frac{K_{n+1}(p)}{d_0 \cdot l_0} \tag{15a}$$

die Gleichungen

$$x_{c_{n+1}} = A_{n+1} \cdot x_{c_1} + B_{n+1} \cdot d_0 \cdot l_0 \cdot \sigma_{n+1} - \\ - \sum_{j=1}^{n} E_{n+1,\,j} \cdot d_0 \cdot l_0 \cdot \sigma_{c_j} , \tag{15b}$$

$$\sigma_1 = -\frac{C_{n+1}}{d_0 \cdot l_0} \cdot x_{c_1} + A_{n+1} \cdot \sigma_{n+1} - \sum_{j=1}^{n} G_{n+1,j} \cdot \sigma_{cj} .$$

Mit dem Spannungsgleichgewicht

$$\sigma_1 = \sigma_{n+1} = \sigma \tag{16}$$

folgt

$$x_{c_{n+1}} = \left[A_{n+1} - \frac{B_{n+1} \cdot C_{n+1}}{1 - A_{n+1}}\right] \cdot x_{c_1} - \frac{B_{n+1} \cdot d_0 \cdot l_0}{1 - A_{n+1}} \times \\ \times \sum_{j=1}^{n} G_{n+1,j} \cdot \sigma_{cj} - \sum_{j=1}^{n} E_{n+1,j} \cdot d_0 \cdot l_0 \cdot \sigma_{cj} , \tag{17a}$$

$$\sigma = -\frac{C_{n+1}}{d_0 \cdot l_0(1 - A_{n+1})} \cdot x_{c_1} - \frac{1}{1 - A_{n+1}} \sum_{j=1}^{n} G_{n+1,j} \cdot \sigma_{cj} . \tag{17b}$$

Man erkennt, daß die Bewegungen $x_{c_{n+1}}$ und x_{c_1} im Gegensatz zur Gl. (12a) im allgemeinen nicht mehr symmetrisch sind. Die Änderung des Umfanges folgt zu

$$u(p) = x_{c_{n+1}}(p) - x_{c_1}(p) \tag{18}$$

bzw.

$$x_{c_1} = \frac{-1}{\dfrac{B_{n+1} \cdot C_{n+1}}{1 - A_{n+1}} + 1 - A_{n+1}} \times \\ \times \left\{u + \frac{B_{n+1} \cdot d_0 \cdot l_0}{1 - A_{n+1}} \sum_{j=1}^{n} G_{n+1,j} \cdot \sigma_{cj} + \right. \\ \left. + \sum_{j=1}^{n} E_{n+1,j} \cdot d_0 \cdot l_0 \cdot \sigma_{cj}\right\} \tag{19}$$

und das in Gl. (17b) eingesetzt ergibt die zu Gl. (14) analoge Beziehung

$$\sigma = \frac{C_{n+1}}{d_0 \cdot l_0 \cdot [B_{n+1} \cdot C_{n+1} + (1 - A_{n+1})^2]} \cdot u - \\ - \frac{1}{(1 - A_{n+1})} \left\{1 - \frac{B_{n+1} \cdot C_{n+1}}{B_{n+1} \cdot C_{n+1} + (1 - A_{n+1})^2}\right\} \times \\ \times \sum_{j=1}^{n} G_{n+1,j} \cdot \sigma_{cj} + \frac{C_{n+1}}{B_{n+1} \cdot C_{n+1} + (1 - A_{n+1})^2} \times \\ \times \sum_{j=1}^{n} E_{n+1,j} \cdot \sigma_{cj} . \tag{20}$$

Nimmt man eine homogene Muskelfaser an, vereinfacht sich mit Gl. (7b) die Gl. (20) zu einer Gl. (14) ähnlichen Beziehung

$$\sigma = \frac{1}{2} \frac{1 + A_{n+1}}{d_0 \cdot l_0 \cdot B_{n+1}} u - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{n} G_{n+1,j} \cdot \sigma_{cj} + \\ + \frac{1 + A_{n+1}}{2 \cdot B_{n+1}} \cdot \sum_{j=1}^{n} E_{n+1,j} \cdot \sigma_{cj} . \tag{21}$$

Werden alle Zellen der Faser gleichzeitig und gleichartig erregt, folgt mit

$$\sigma_{cj} = \sigma_c , \qquad j = 1, 2, \dots, n \tag{22a}$$

die Beziehung

$$\sigma = \frac{1}{2} \frac{1 + A_{n+1}}{d_0 \cdot l_0 \cdot B_{n+1}} u + \sigma_c . \tag{22b}$$

Mit Hilfe dieser verschiedenen Gleichungen kann die Erregung der einzelnen Zellen des Ringes gleich oder verschieden gewählt werden (Bild 6c).

Für ein Kammermodell sind die dynamischen Abhängigkeiten von Innendruck $p_p(p)$, Volumenänderung $V(p)$ oder Blutstrom $i(p)$ und kontraktile Spannungen $\delta_{cj}(p)$ interessant. Es muß also die Wandspannung $\sigma(p)$ durch den Innendruck $p_p(p)$ ausgedrückt werden. Dies erfolgt nach dem Laplaceschen Gesetz (Bild 6d), wonach der auf beide Ringhälften wirkende Druck p_p die Sprengkraft

$$K_s = p_p \cdot 2 \cdot r_0 \cdot l_0 \tag{23}$$

erzeugt, die durch die zwei Wandkräfte

$$2K_w = 2\sigma \cdot d_0 \cdot l_0 \tag{24}$$

im Gleichgewicht

$$K_s = 2K_w \tag{25}$$

gehalten werden, d. h.

$$p_p(p) = \frac{d_0}{r_0} \cdot \sigma(p) . \tag{26}$$

Weiterhin muß die Umfangsänderung $u(p)$ durch die Volumenänderung $i(p)$ ausgedrückt werden. Ändert sich der Radius r_0 um $r(p)$, so ändert sich der Umfang zu

$$u(p) = 2\pi r(p) \tag{27}$$

und die Seitenfläche F_F bei Vernachlässigung des quadratischen Gliedes zu

$$r(p) = \frac{1}{2\pi r_0} \cdot F_F(p)\,, \tag{28}$$

und mit Gl. (27) folgt

$$u(p) = \frac{1}{r_0 \cdot l_0 \cdot p} \cdot p \cdot l_0 \cdot F_F(p)\,. \tag{29}$$

Mit der Volumenänderung

$$V(p) = l_0 \cdot F_F(p) \tag{30}$$

und

$$p \cdot V(p) = \mathbf{L}\left\{\frac{\mathrm{d}V(t)}{\mathrm{d}t}\right\} = L\{i(t)\} = i(p) \tag{31}$$

folgt

$$u(p) = \frac{1}{r_0 \cdot l_0 \cdot p}\, i(p)\,. \tag{32}$$

Innerhalb des Muskelringes tritt ein Blutstrom $i(p)$ (Untersuchungen hierzu in [19]) auf, der vereinfachend als laminare instationäre Strömung in einem Rohr angenommen wird (Bild 7).

$$p_{p_1}(p) - p_{p_2}(p) = l_0(R + M\cdot p)\cdot i(p)\,, \tag{33}$$

$$R = \frac{8\eta}{\pi \cdot r_0^4}\,, \qquad M = \frac{\varrho}{\pi r_0^2}\,.$$

η - Blutzähigkeit, ϱ - Blutdichte

Diese Strömung tritt am Eingang und am Ausgang des Ringes auf, so daß das Kammermodell aus der Zusammenschaltung des halben dynamischen Strömungswiderstandes am Eingang, einem veränderlichen Volumen und des halben dynamischen Strömungswiderstandes am Ausgang (Bild 7) besteht (diese Anordnung ergibt wieder Struktursymmetrie).

$$p_{p_1} = \tfrac{1}{2}\, l_0(R + M\cdot p)\cdot i_1 + p_{p_3}\,, \tag{34a}$$

$$p_{p_3} = \tfrac{1}{2}\, l_0(R + M\cdot p)\cdot i_2 + p_{p_2} \tag{34b}$$

und mit Gl. (14)

$$p_{p_3} = \frac{1}{2}\,\frac{(1 + F_1)}{r_0^2 \cdot l_0^2 \cdot p \cdot F_2}\cdot i_3 + \frac{d_0}{r_0}\cdot \sigma_c \tag{34c}$$

bzw. mit Gl. (20)

$$\begin{aligned} p_{p_3} = {} & \frac{C_{n+1}}{p\cdot r_0^2 \cdot l_0^2[B_{n+1}C_{n+1} + (1 - A_{n+1})^2]}\cdot i_3 - \\ & - \frac{1}{(1 - A_{n+1})}\left\{1 - \frac{B_{n+1}\cdot C_{n+1}}{B_{n+1}\cdot C_{n+1}(1 - A_{n+1})^2}\right\}\times \\ & \times \sum_{j=1}^{n} G_{n+1,j}\cdot\frac{d_0}{r_0}\cdot\sigma_{cj} + \\ & + \frac{C_{n+1}}{B_{n+1}\cdot C_{n+1} + (1 - A_{n+1})^2}\sum_{j=1}^{n} E_{n+1,j}\cdot\frac{d_0}{r_0}\cdot\sigma_{cj}\,. \end{aligned} \tag{34d}$$

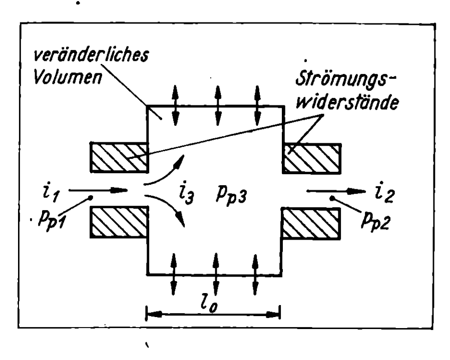


Bild 7. Schnitt durch das Herzkammermodell

Hieraus folgt für die Gl. (34b) das isotonische System des Kammermodells nach Bild 7 auf der Grundlage einer gekrümmten Zelle zu

$$i_2 = \widetilde{F}_1 \cdot i_1 - \widetilde{F}_2 \cdot \left[p_{p_2} - \frac{d_0}{r_0}\sigma_c\right], \tag{35a}$$

$$p_{p_1} = \frac{1 - \widetilde{F}_1^2}{\widetilde{F}_2}\cdot i_1 + \widetilde{F}_1 \cdot p_{p_2} + (1 - \widetilde{F}_1)\cdot\frac{d_0}{r_0}\sigma_c \tag{35b}$$

mit

$$\left.\begin{aligned} \widetilde{F}_1 &= \frac{1}{1 + \dfrac{\frac{1}{2}\, l_0(R + M\cdot p)}{\dfrac{1 + F_1}{2r_0^2\cdot l_0^2\cdot p\cdot F_2}}}\,, \\ \widetilde{F}_2 &= \frac{1}{\dfrac{1 + F_1}{2r_0^2\cdot l_0^2 p F_2} + \dfrac{1}{2}\, l_0(R + Mp)} \end{aligned}\right\} \tag{35c}$$

und nach Gl. (34c) das isotonische System des Kammermodells auf der Grundlage einer gekrümmten aus n Zellen bestehenden Muskelfaser

$$\begin{aligned} i_2 = \widetilde{A}\cdot i_1 - \widetilde{B}\cdot \Bigg[p_{p_2} & + \frac{1}{1 - A_{n+1}}\times \\ & \times\left\{1 - \frac{B_{n+1}\cdot C_{n+1}}{B_{n+1}\cdot C_{n+1} + (1 - A_{n+1})^2}\right\}\times \\ & \times\sum_{j=1}^{n} G_{n+1,j}\cdot\frac{d_0}{r_0}\cdot\sigma_{cj} - \frac{C_{n+1}}{B_{n+1}\cdot C_{n+1} + (1 - A_{n+1})^2}\times \\ & \times\sum_{j=1}^{n} E_{n+1,j}\cdot\frac{d_0}{r_0}\sigma_{cj}\Bigg] \end{aligned} \tag{36a}$$

$$\begin{aligned} p_{p_1} = \frac{1 - \widetilde{A}^2}{\widetilde{B}}\cdot i_1 + \widetilde{A}\cdot p_{p_2} - (1 - \widetilde{A}) & \left[\frac{1}{1 - A_{n+1}}\times\right. \\ & \times\left\{1 - \frac{B_{n+1}\cdot C_{n+1}}{B_{n+1}\cdot C_{n+1} + (1 - A_{n+1})^2}\right\}\times \\ & \times\sum_{j=1}^{n} G_{n+1,j}\cdot\frac{d_0}{r_0}\sigma_{cj} - \\ & - \frac{C_{n+1}}{B_{n+1}\cdot C_{n+1} + (1 - A_{n+1})^2}\times \\ & \left.\times\sum_{j=1}^{n} E_{n+1,j}\cdot\frac{d_0}{r_0}\cdot\sigma_{cj}\right] \end{aligned} \tag{36b}$$

mit

$$\widetilde{A} = \frac{1}{1 + \dfrac{\frac{1}{2}\, l_0\cdot(R + M\cdot p)}{\dfrac{C_{n+1}}{r_0^2\cdot l_0^2\cdot p\cdot[B_{n+1}\cdot C_{n+1} + (1 - A_{n+1})^2]}}}\,, \tag{36c}$$

$$\widetilde{B} = \frac{1}{\dfrac{C_{n+1}}{r_0^2\cdot l_0^2\cdot p\cdot[B_{n+1}\cdot C_{n+1} + (1 - A_{n+1})^2]} + \dfrac{1}{2}\, l_0(R + M\cdot p)}\,.$$

5. Mögliche Modellerweiterungen

Auf der Grundlage des bisher Dargelegten sind Modellerweiterungen möglich, die jedoch hier nur kurz erwähnt werden sollen:

a) Ausgehend von der Gl. (34b) bzw. Gl. (34c) kann ein mehrschichtiges (d. h. eine aus beliebig vielen ringförmigen, dicht aneinanderliegenden, sich jedoch im Gegensatz zu Bild 2a gleichsinnig überdeckenden Muskelfaserschichten bestehende Kammerwand) Kammermodell, das der Struktur im Bild 2a näherkommt, ohne große Schwierigkeiten aufgebaut werden.

b) Die Gln. (35) bzw. (36) sind den Gln. (5) ähnlich. Daher ist es analog Gln. (6) möglich, ein Kammermodell aus in Reihe geschalteten Kammerringen (diskretes Modell) aufzubauen und durch entsprechende Wahl der d_{0_i}, l_{0_i} der Kammer eine beliebige, z. B. tonnenförmige, Gestalt zu geben

c) Läßt man die Breite eines Ringes l_0 (Bild 7) im Grenzübergang gegen Null gehen, kann man eine partielle Differentialgleichung ableiten, die das stückweise Zusammensetzen von Ringen vermeidet und eine kontinuierliche Formgebung ermöglicht. Natürlich ist dieses Vorgehen auch für den Aufbau einer Faser möglich.

6. Anwendungen

Ständig von der wahren, nichtlinearen, dynamischen und räumlichen (aus spiralförmig gekrümmten, sich entgegengesetzt mehrschichtig überdeckenden Muskelfasern mit netzartiger Struktur und oberhalb angeordneten Ein- und Ausströmöffnungen) Struktur einer Herzkammer mit instationärer und zeitweise turbulenter Strömung abstrahierend, wurde systematisch auf der Beschreibung eines Sarkomer basierend ein lineares, dynamisches, zylindrisches (aus ringförmig gekrümmten, einschichtigen Muskelfasern und an den Seiten angeordneten Einström- und Ausströmöffnungen) Herzkammermodell mit instationärer und laminarer Strömung aufgebaut. Diese zusammenfassende Gegenüberstellung läßt den Abstand zwischen Modell und Wirklichkeit bewußt werden. Trotzdem ist das Modell mit Hilfe der Gln. (35) oder (36) prinzipiell in der Lage, Lösungen für eine Reihe von experimentellen Fragestellungen zu liefern:

a) Füllung

Gegeben ist $p_{p_1}(t)$ und $\sigma_{cj} = 0$ für alle j, da die Wand erschlafft ist, sowie $i_2(t) = 0$. Gesucht ist $i_1(t)$ und $p_{p_2}(t)$.

b) Isovolumetrische Anspannung

Gegeben sind $i_1(t) = i_2(t) = 0$ sowie die σ_{cj}. Gesucht sind die Drücke $p_{p_1}(t)$ und $p_{p_2}(t)$. Aus den Gln. (35) folgt sofort die Laplacesche Beziehung Gl. (26). Dagegen ergeben die Gln. (36) eine Differentialgleichung

$$p_{p_2} = p_{p_1} = -\frac{1}{1 - A_{n+1}} \times \left\{1 - \frac{B_{n+1} \cdot C_{n+1}}{B_{n+1} \cdot C_{n+1} + (1 - A_{n+1})^2}\right\} \times \sum_{j=1}^{n} G_{n+1,j} \cdot \frac{d_0}{r_0} \cdot \sigma_{cj} - \frac{C_{n+1}}{B_{n+1} \cdot C_{n+1} + (1 - A_{n+1})^2} \times \sum_{j=1}^{n} E_{n+1,j} \cdot \frac{d_0}{r_0} \cdot \sigma_{cj}, \quad (37)$$

deren Lösung den Kammerinnendruck ergibt. Eine Differentialgleichung ergibt sich deshalb, weil infolge möglicher unterschiedlicher kontraktiler Wandspannungen und Inhomogenitäten radiale Wandverschiebungen und dadurch verschiedene Druckverläufe auftreten können.

c) Auswurf

Gegeben sind $i_2(t)$ oder $p_{p_2}(t)$ bzw. der periphere Abstromwiderstand, der experimentell im Tierversuch an ein isoliertes Herz angeschlossen wird oder am lebenden Objekt das Kreislaufsystem (Bild 1) ist, sowie $i_1 = 0$ und alle σ_{cj}. Gesucht sind $p_{p_2}(t)$ oder $i_2(t)$ bzw. beide Größen.

Bei allen diesen Fragestellungen können den einzelnen Zellen des Ringes (und in den erweiterten Modellen den Zellen in den verschiedenen Ringen und Schichten) verschiedene Eigenschaften zugeordnet werden. Haben z. B. alle Zellen kontraktile Eigenschaften bis auf eine mit schwach kontraktilen oder rein elastischen, so erhält man ein einfaches Ischämie- oder Infarkt-Modell. Läßt man die Kontraktionen σ_{cj} nicht zeitlich gleichförmig, sondern „ungeordnet" angreifen, so erhält man ein Modell für das Kammerflimmern.

7. Zusammenfassung

Aufbauend auf der Mechanik eines Muskelstückes (Sarkomer) wurde ein einfaches Modell für die Mechanik einer Herzkammer entwickelt. Es ergeben sich auf allen Stufen stets zwei miteinander gekoppelte Differentialgleichungssysteme, die wegen der vorausgesetzten Linearität der Einfachheit halber in laplacetransformierter Form angegeben wurden. Die Übertragungsfunktionen (Struktur der Differentialgleichungen) werden jedoch von Stufe zu Stufe komplizierter. Die Systemstruktur des Kammermodells gestattet es, einfache aber auch komplizierte, d. h. aus unterschiedlichen Wandelementen bestehende, konkrete Modelle zur Lösung praktischer Fragestellungen abzuleiten.

Literatur

[1] *van den Broek, J. H. J. M.; van der Gon, J. J.:* A Model for Left Ventricular Contractions Based on the Sliding Filament Theory. In: *Baan, J.; Arntzenius, A. C.; Yellin, E. L.* (eds.): Cardiac Dynamics. The Hague, Boston, London: Martinns Nijhoff Publishers bv. 1980 pp. 135–142.

[2] *Mirsky, J.; Rankin, J. S.:* The Effects of Geometry, Elasticity and External Pressures on the Diastolic Pressure — Volume and Stiffness-Stress Relations. Circulation Research **44** (1979) No. 5, pp. 601–611.

[3] *Phillips, C. A.; Grood, S.; Schuster, B.:* Contractile Filament and Series Elastic Work and Power — I. Mathematical Development and Application to Left Ventricular Cineangiographic Measurements. J. Biomechanics **12** (1979) pp. 551–557.

[4] *Suga, H.:* Minimal Oxygen Consumption and Optimal Contractility of the Heart: Theoretical Approach to Principle of Physiological Control of Contractility. Bulletin of Mathematical Biology **41** (1979) pp. 139–150.

[5] *Min, B. G.; Welkowitz, W.; Fich, S.:* Frequency Analysis of Time-Varying Elastance Model of the Left Ventricle. Bulletin of Mathematical Biology **42** (1980) pp. 173–180.

[6] *van der Werff, T. J.; Hanmer, L. A.:* The Dynamic Interaction of the Left Ventricle and Systemic Arteries. INSERM — Euromech 92, Cardiovascular and pulmonary dynamics **71** (1977) Sept., pp. 351–360.

[7] *Arts, T.; Reneman, R. S.; Veenstra, P. C.:* A Model of the Mechanics of the Left Ventricle. Annals of Biomedical Engineering. **7** (1979) pp. 299–318.

[8] *van den Broek, J. H. J. M.; van der Gon, J. J.:* A Model Study of isovolumic and nonisovolumic Left Ventricular Contractions. J. Biomechanics **13** (1980) pp. 77–87.

[9] *van den Broek, J. H. J. M.; van den Broek, M. H. L. M.:* Application of an Ellipsoidal Heart Model in Studying Left Ventricular Contractions. J. Biomechanics **13** (1980) pp. 493–503.

[10] *Huisman, R. M.; Sipkema, P.; Westerhof, N.; Elzinga, G.:* Comparison of Models used to calculate Left Ventricular Wall Force. Med. and Biol. Eng. and Comput. **18** (1980) pp. 133–144.

[11] *Moskowitz, S. E.:* On the Mechanics of Left Ventricular Diastole. J. Biomechanics **13** (1980) pp. 301–311.

[12] *Stein, P. D.; Sabbah, H. N.; Marzilli, M.; Blick, E. F.:* Comparison of the Distribution of Intramyocardial Pressure across the Canine Left Ventricular Wall in the Beating Heart during Diastole and in the Arrested Heart. Circulation Research **47** (1980) Aug., pp. 258–267.

[13] *Schmidt, R. F.; Thews, G.:* Physiologie des Menschen. Westberlin/Heidelberg/New York: Springer-Verlag 1980.

[14] *Bertolini, R.; Leutert, G.; Rother, P.; Scheuner, G.; Wendler, D.:* Systematische Anatomie des Menschen. Berlin: VEB Verlag Volk und Gesundheit 1979.

[15] *Braunwald, E.; Ross, J. Jr.; Sonnenblick, E. H.:* Mechanisms of Contraction of the Normal and Failing Heart. Boston: Little, Brown and Company 1967.

[16] *Bendel, U.:* Eine neue Systemtheorie der Muskelmechanik. studia biophysica **75** (1979) H. 1., S. 31–40.

[17] *Bendel, U.; Schubert, E.:* Zur Bedeutung von mathematischen Modellen in der Physiologie. Wiss. Z. Karl-Marx-Universität Leipzig **29** (1980) H. 2, S. 91–101.

[18] *Bendel, U.:* Systemtheoretical description of striated muscle mechanics (Kurzfassung). In: Systems Analysis and Simulation 1980 (edited by *Sydow, A.*). Berlin: Akademie-Verlag 1980.

[19] *Rüdiger, W.:* Lehrbuch der Physiologie, Teil 2. Berlin: VEB Verlag Volk und Gesundheit 1978.

[20] *Peskin, C. S.:* Numerical Analysis of Blood Flow in the Heart. Journal of Computational Physics **25** (1977) No. 3, Nov.

msr 7487

Dr. phil. *K. Steinmüller*, Berlin[1])

Zur Steuerung von Schaderregern in Agroökosystemen

IA 5.9.3.

0. Einleitung

Steuerungstheoretische Methoden haben in den letzten beiden Jahrzehnten auch in nicht-technischen Bereichen, wie in der Landwirtschaft, eine verstärkte Anwendung erfahren. Ziel der Agroökosystemsteuerung ist u. a. eine Effektivierung der Pflanzenproduktion, insbesondere durch eine Verminderung der Ertragsverluste durch Schaderreger (Insekten, Krankheiten, Unkräuter), die in globalem Maßstab auf 30% geschätzt werden.

Bislang und in absehbarer Zukunft stehen chemische Methoden der Schaderregerbekämpfung (Pestizideinsatz) im Vordergrund. Diese Methoden verbinden hohe Effektivität und Praktikabilität mit unerwünschten Nebenwirkungen: Herausbildung resistenter Schaderregerstämme, Vernichtung der natürlichen Feinde der Schaderreger, Rückstände im produzierten Nahrungsmittel, Umwelteffekte. Hinzu kommen die Kosten für das Pestizid (mitunter Import) und für dessen Ausbringung (Kraftstoff) [11]. Für die steuerungstheoretische Behandlung des Problems steht damit die Aufgabe, Strategien zu finden, die eine Minimierung der Schadwirkung (Ertragsminderung) bei gleichzeitiger Minimierung der Steuerkosten und Nebenwirkungen beinhalten. Herkömmliche Strategien bestehen in der Festlegung von Bekämpfungsrichtwerten, d. h. Schwellwerten für den Schaderregerbefall, bei deren Überschreiten Pestizid appliziert wird. Die Dosierung wird nicht anhand der zu erwartenden Schaderregerentwicklung (Prognose) und bestimmter Optimalitätskriterien berechnet, sie liegt in der Regel zu hoch (um jegliches Risiko der Ertragsminderung auszuschalten). Modelle der Schaderregersteuerung können hier die Situation dadurch verbessern, daß Dosierung und Zeitpunkt des Pestizideinsatzes von der Entwicklung des Schaderregers (und der Kulturpflanze sowie der zu erwartenden Witterung) abhängig gemacht und unter Berücksichtigung von Aufwand und Nutzen optimiert werden (Abschn. 2.). In der Praxis bedeutet dies u. a. einen Übergang zu dynamischen Bekämpfungsrichtwerten. Zunehmende Aufmerksamkeit wird dem integrierten Pflanzenschutz geschenkt [15] und [19], der auch mechanische und biologische Verfahren der Schaderregerbekämpfung berücksichtigt (Erweiterung des Steuerraumes) und damit zur Verminderung der Pestizidanwendung beiträgt. Ein Beispiel hierzu wird im Abschn. 3. diskutiert. Unzureichend erforscht ist bislang die Wechselwirkung (Koaktion) mehrerer Schaderreger auf die Kulturpflanze. Bereits einfache Wachstumsmodelle zeigen, daß der Gesamtschaden sich i. allg. weder nach einem additiven noch nach einem multiplikativen Ansatz ergibt. Damit werden Steuerungsaussagen für Systeme mit mehreren Schaderregern in hohem Maße abhängig von der Erarbeitung von Agroökosystemmodellen, die Kulturpflanze, Schaderreger und Bekämpfungsmaßnahmen einschließen.

1. Überblick über den Entwicklungsstand der Theorie

Unter den Modellen für die Schaderregersteuerung lassen sich theoretische Ansätze zur Ableitung optimaler Strategien (meist Differential- oder Differenzengleichungen einfacher Struktur) und Simulationsmodelle für die praktische Anwendung unterscheiden. Beispielhaft für letztere seien die Pest-Management-Modelle von *Holling* [6] und *Shoemaker* [16] genannt.

Einen Ausgangspunkt für die theoretischen Untersuchungen zur Schaderregersteuerung bilden die populationsdynamischen Modelle des Volterra-Lotka-Typs. Insbesondere werden Räuber-Beute-Systeme untersucht [2] [9] und [18], wobei gewöhnlich die Beutepopulation als der Schaderreger (Phytophage) und die Predatorenpopulation als dessen natürlicher Feind (Entomophage) betrachtet werden. Ziel ist es i. allg., das System so zu steuern, daß Populationsausbrüche des Schaderregers verhindert werden. Das vorausgesetzte Modell hat dabei die Gestalt:

$$\dot{N}_1 = N_1(a - bN_2) + e_1 v(t) - e_2 u(t)\, N_1$$
$$\dot{N}_2 = N_2(-c + dN_1) + e_3 v(t) - e_4 u(t)\, N_2\,,$$

wobei N_1 die Beutepopulation, N_2 die Predatorenpopulation, $v(t)$ die lineare und $u(t)$ die bilineare zeitkontinuierliche Steuervariable sind. Für verschiedene Parameterkonstellationen wurden unter Voraussetzung eines lineare Gütefunktionals und des neutral-stabilen nichttrivialen Gleichgewichtspunktes $\overline{N}_1 = c/d$, $\overline{N}_2 = a/b$ oder des trivialen Gleichgewichtspunktes (0, 0) als Endzustand mit Hilfe des Pontrjaginschen Maximumprinzips optimale Steuerungen abgeleitet.

Eine Erweiterung dieser deterministischen Modelle durch ein stochastisches Wachstum der Schaderregerpopulation wurde von *Morton* [14] vorgenommen. *Hirata* [5] gab einen Überblick über bilineare Steuerungen beliebiger, auch nicht-bilinearer nicht-trophischer Zwei-Populationen-Systeme. Die Modellgleichungen haben dabei die Gestalt:

$$\dot{N}_i = N_i F_i(N_i, N_j) - e_i f_i(t)\, u(t)\, N_i \qquad i, j = 1,2; \qquad i \neq j\,,$$

wobei $u(t)$ die Steuervariable (Pestiziddosis) und $f_i(t)$ die Wirkungsfunktion des Pestizids darstellten. Bei in N_i und u linearem Gütefunktional und dem vorausgesetzten nichttrivialen Gleichgewichtspunkt als Endzustand ist die optimale Steuerung für fast alle Parameterkonstellationen vom Zwei-Punkt-Typ. *Isaev* u. a. [8] diskutierten, ohne eine explizite Steuerungsaufgabe zu formulieren, die Auswirkungen von mehreren nichttrivialen Gleichgewichtspunkten und ihren Stabilitätseigenschaften auf mögliche Steuerungsstrategien [13].

Für die praktische Anwendung zur Schaderregerbekämpfung in Agroökosystemen weisen die theoretischen Modelle für die Steuerung von Räuber-Beute-Systemen jedoch prinzipielle Unzulänglichkeiten auf:

- Die Dynamik der Kulturpflanze wird nicht berücksichtigt. Da diese i. allg. wesentlich langsamer verläuft als die Entwicklung schaderregender Insektenpopulationen, kann unter Umständen eine Entkopplung vorgenommen werden [13]. Jedoch hängt die in das Zielfunktional eingehende Ertragsminderung i. allg. nur über Kulturpflanzenvariable vermittelt und daher nichtlinear vom Befall ab
- Der Einfluß von Umweltfaktoren, insbesondere Witterung, wird nicht erfaßt
- Die Steuerung wird als zeitkontinuierliche Variable vorausgesetzt. Praktisch erfolgen jedoch nur wenige zeitdiskrete Steuereingriffe (Pestizidbehandlungen) sowie eine wahrscheinlich exponentiell anzusetzende Depotwirkung des Pestizids.

Der Abschn. 3. ist der Steuerung von Räuber-Beute-Systemen bei zeitdiskreten Steuereingriffen gewidmet.

[1]) Vortrag anläßlich der 10. Jahrestagung „Grundlagen der Modellierung und Simulation" (8. bis 10. Dezember 1981) in Rostock.
Mitteilung aus dem Zentralinstitut für Kybernetik und Informationsprozesse der AdW der DDR.

Einen weiteren Ausgangspunkt für theoretische Untersuchungen zur Schaderregersteuerung bilden deterministische oder stochastische Einzelpopulationsmodelle mit oder ohne Altersklassen. Die zeitdiskreten Modelle der Form $x(t+1) = f(x(t)) - u(t)$ gestatten eine Prognose der Schaderregerentwicklung [4] [10] und [17]. Darauf aufbauend werden unter Zugrundelegung eines linearen Zielfunktionals, das Schaden und Pestizidkosten berücksichtigt, mit Hilfe der dynamischen Optimierung die optimalen Zeitpunkte und Dosierungen der mehrfachen, diskreten Pestizidapplikation berechnet.

Fragen der wachsenden Pestizid-Resistenz der Schaderreger werden ebenfalls in zeitdiskreten Modellen [1] und [7] erfaßt. Hauptaussage ist hierbei, daß zu hohe Pestizidgaben und damit zu hoher Selektionsdruck für die Durchsetzung resistenter Allelen vermieden werden sollten.

Altersklassen des Schaderregers, die gerade bei Schadinsekten mit wohldefinierten Entwicklungsstadien bedeutsam sind, werden zumeist in kontinuierlichen Modellen (partielle Differentialgleichung) erfaßt [3] [9] und [12]:

$$x_t(t, a) + x_a(t, a) + M(t, a) + P(t, a) = I(t, a) ,$$

wobei a das kalendarische Alter, $x(t, a)$ die Schaderregerabundanz zur Zeit t in der Altersklasse a, M, P und I Mortalitäts-, Steuerungs- und Immigrationsterm sind. Bei als bekannt vorausgesetzten altersabhängigen Schad- bzw. Steuerfunktionen kann auch hier mit Hilfe des Maximumprinzips eine optimale Steuerung $P(t, a)$ errechnet werden. Zusätzlich zu den schon bei Räuber-Beute-Modellen erwähnten Unzulänglichkeiten treten hier die folgenden auf:

- Es existiert kein ideales Pestizid in dem Sinne, daß eine vorgegebene altersabhängige Schaderregerreduktion $P(t, a)$ realisiert werden kann.
- Der Zustand der Population $x(t_0, a)$ läßt sich weniger genau schätzen als eine nicht altersklassenabhängige Abundanz.

Im Abschn. 2. wird die Umweltabhängigkeit dieser Modelle durch Einführung einer expliziten Umweltabhängigkeit des physiologischen Alters (im Gegensatz zum kalendarischen Alter a) aufgehoben.

Generell sind die bisherigen theoretischen Steuerungsansätze den komplizierten Praxisbedingungen nicht voll gewachsen. Faktoren, wie die Stochastik der Einflußfaktoren (schlechte Vorhersagbarkeit der Umweltvariablen), die Komplexität, Variabilität und Heterogenität der betrachteten Ökosysteme können nur in Simulationsmodellen für eine praktische Steuerung hinreichend adäquat erfaßt werden, jedoch gestatten theoretische Untersuchungen eine a-priori-Einschränkung der Menge der sinnvollerweise zu betrachtenden Strategien (Suchraum).

2. Steuerung von Schadinsekt-Einzelpopulationen

In Erweiterung des Ansatzes von *Marsolan* und *Rudd* [12] wird in diesem Abschnitt eine Methode vorgeschlagen, möglichst effektive Bekämpfungsstrategien für Schadinsektpopulationen abzuleiten. Dieses Problem tritt z. B. im Winterweizen-Agroökosystem auf. Speziell kann der Befall durch den Schaderreger Getreidehähnchen (Oulema lichenis) auf die hier angegebene Weise beschrieben werden. Im folgenden soll zuerst ein Modell für die Schadinsektpopulation aufgestellt und anschließend eine Methode zum Auffinden von Steuerungen angegeben werden.

Der Zustand einer Population von Schadinsekten kann durch die Anzahl der Individuen $x(t, s)$ beschrieben werden, die sich zu einem bestimmten Zeitpunkt t in einem ontogenetischen Entwicklungszustand (physiologisches Alter) s befindet. Unter dem ontogenetischen Zustand soll hier weder das Entwicklungsstadium (Ei, Larve, Puppe, Imago), noch das kalendarische Alter a verstanden werden. Eine Einteilung in Entwicklungsstadien ist für unsere Zwecke zu grob, aus ihr kann u. a. schlecht auf die Übertrittswahrscheinlichkeit von einem Stadium ins nächste geschlossen werden. Die ausschließliche Benutzung des kalendarischen Alters scheidet deshalb aus, weil das physiologische Alter nicht nur von der Anzahl der Tage seit der Eiablage, sondern in weit höherem Maße von der bisherigen (physiologisch wirksamen) Umgebungstemperatur abhängt. Im einfachsten Fall kann diese Abhängigkeit eine Temperatursumme sein. Der ontogenetische Zustand $s(t, a)$ eines Individuums ist eine Funktion der Zeit t und des kalendarischen Alters a. Für den täglichen ontogenetischen Entwicklungsfortschritt der Individuen einer Population ist daher eine partielle Differentialgleichung anzusetzen:

$$\frac{d}{dt} s(t, a) = s_t(t, a) + s_a(t, a) = g(t, a) . \qquad (1)$$

Die Bedeutung von $g(t, a)$ ist leicht aus dem Fall nur einer Altersklasse zu erschließen, in dem $\dot{s}(t) = g(t)$ gilt. Der Term $g(t, a)$ ist damit der Entwicklungsfortschritt in der Altersklasse a, dessen Umweltabhängigkeit durch die explizite Zeitabhängigkeit erfaßt wird. Für altersklassenunabhängige Temperatursummen gilt einfach $g(t, a) = T(t) - T_0$. Wir werden im folgenden stets vereinfachend $g(t, a) = g(t)$ annehmen. Als Anfangs- und Randbedingungen für Gl. (1) wird benutzt, daß jede kalendarische Altersklasse a einen bestimmten initialen ontogenetischen Zustand $s_0(a)$ hat und daß dieser per Konvention in der nullten Altersklasse stets Null beträgt:

$$s(0, a) = s_0(a), \qquad s(t, 0) = 0 . \qquad (2)$$

Beim Aufstellen der partiellen Differentialgleichung für die Abundanz $x(t, s)$ ist zu beachten, daß gilt:

$$\frac{d}{dt} x(t, s) = x_t(t, s) + x_s(t, s) \cdot \frac{d}{dt} s(t, a) = x_t(t, s) + g(t)\, x_s(t, s) .$$

Die zeitliche Entwicklung der Population läßt sich dann in folgender Form darstellen [12]:

$$x_t(t, s) + g(t)\, x_s(t, s) + M(t, s) + P(t, s) = I(t, s) . \qquad (3)$$

Dabei sind:

- $M(t, s) = m(s)\, x(t, s)$ der Mortalitätsterm mit ontogeneseabhängiger natürlicher Mortalitätsrate
- $P(t, s) = (1 - m(s))\, u(t, s)\, x(t, s)$ die durch Pestizidanwendung hervorgerufene zusätzliche Mortalität
- $I(t, s) = i(t, s)\, (x_m(t, s) - x(t, s))$ der dichteabhängige Immigrationsterm ($x_m(t, s)$ ist die Gleichgewichtsdichte.

Über die Funktion $g(t)$ geht die Umweltabhängigkeit in die Modellgleichung ein. Der Ausdruck $u(t, s)$ ist die Steuervariable, die die ontogeneseabhängige, durch das Pestizid hervorgerufene Mortalitätsrate angibt (Reduktionsfunktion). Als Anfangs- und Randbedingungen sind anzusetzen:

$$x(0, s) = x_0(s); \qquad x(t, 0) = \int_0^{s_{max}} B(s)\, x(t, s)\, ds . \qquad (4)$$

Dabei ist $x_0(s)$ die initiale Verteilung der Individuen über den ontogenetischen Zustand s, $B(s)$ gibt die Ovipositionsrate (Eiproduktionsrate) der Individuen im ontogenetischen Zustand s an.

Infolge der zeitlich verteilten Oviposition muß selbst dann mit der partiellen Differentialgleichung (3) gearbeitet werden, wenn sich alle Individuen ursprünglich im gleichen ontogenetischen Zustand befanden, wie dies z. B. nach der Überwinterung von Oulema anzunehmen ist.

Das Gleichungssystem (1) bis (4) wird prinzipiell dadurch gelöst, daß zuerst aus Gl. (1) und Gl. (2) die Dynamik von $s(t, a)$ ermittelt und dann unter Zuhilfenahme von $s(t, a)$ das Gleichungssystem (3) und (4) gelöst wird. Durch die Annahme $g(t, a) = g(t)$ tritt jedoch eine Entkopplung ein, so daß s in den Gln. (3) und (4) einfach als zusätzliche unabhängige Variable betrachtet werden kann. Als Beobachtungsdaten über die zeitliche Entwicklung der Schaderregerabundanzen liegen normalerweise nur die Anzahlwerte N_i in den verschiedenen Entwicklungsstadien vor. Diese Anzahlen lassen sich mit Hilfe von Zugehörigkeitsfunktionen $c_i(s)$ aus $x(t, a)$ errechnen:

$$N_i(t) = \int_0^{s_{\max}} c_i(s)\, x(t, s)\, \mathrm{d}s\,.$$

Die Zugehörigkeitsfunktionen können leicht durch ein Experiment mit wohldefiniertem Anfangszustand $x_0(s) = x_0\delta(s - s_0)$ gewonnen werden. Problematischer ist eine Zustandsschätzung z. B. aus einem Datensatz $N_i(0)$, die ohne zusätzliche Annahmen über $x_0(s)$ kein eindeutiges Resultat liefert.

Um optimale Bekämpfungsstrategien abzuleiten, ist es nötig, Nutzen (bzw. Schadverminderung) und Kosten zu bewerten. Der durch eine Insektenpopulation hervorgerufene Schaden zu einem bestimmten Zeitpunkt ist sowohl von der Abundanz in den Altersklassen $x(t, s)$ als auch von einer altersklassenspezifischen Wirkung (Schadfunktion) $d(t, s)$ auf die Kulturpflanze abhängig. So schädigen bei Oulema nur die Larven den Weizen, und dies in Abhängigkeit von ihrem ontogenetischen Zustand. In $d(t, s)$ muß gegebenenfalls auch die Reaktion der Kulturpflanze (Kompensationseffekte, Anfälligkeit bzw. Resistenz) berücksichtigt werden; dies kann u. U. nur durch die Ersetzung von $d(t, s)$ durch ein spezielles Kulturpflanzenmodell geschehen. Insgesamt ergibt sich für den Schaden:

$$D = \int_0^{t_{\max}} \int_0^{s_{\max}} d(t, s)\, x(t, s)\, \mathrm{d}s\, \mathrm{d}t\,.$$

Die Steuerkosten sind im wesentlichen von der Menge des verwendeten Pestizids abhängig, dies wirkt sich jedoch nicht linear in der hervorgerufenen Mortalität $u(t, s)$ aus. *Marsolan* und *Rudd* [12] beriefen sich darauf, daß ein quadratischer Ansatz für die Kosten K in guter Übereinstimmung mit der empirisch gefundenen „kill efficiency" steht:

$$K = \int_0^{t_{\max}} \int_0^{s_{\max}} k(t, s)\, u^2(t, s)\, \mathrm{d}s\, \mathrm{d}t\,.$$

Damit ist das Ziel der Steuerung die Minimierung von $J = K + D$. Gemäß [12] kann die Optimierung nach dem Pontrjaginschen Maximumprinzip vorgenommen werden. Die Optimierungsaufgabe lautet dann:

$$\min_{u(t,s)} H(t, s, x, q, u) \tag{5}$$

mit

$$H = d(t, s)\, x(t, s) + k(t, s)\, u^2(t, s) - q(t, s)\, \{g(t)\, x_s(t, s) + m(s)\, x(t, s) + (1 - m(s))\, u(t, s)\, x(t, s) - i(t, s)\, (xm(t, s) - x(t, s))\}\,. \tag{6}$$

Für die konjungierte Variable gilt:

$$q_t(t, s) = -\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial s}\frac{\partial H}{\partial x_s}, \qquad q(1, s) = 0\,, \quad q(t, 1) = 0\,. \tag{7}$$

Infolge des quadratischen Ansatzes für die Steuerkosten führt die Minimierung in Gl. (5) auf

$$u(t, s) = \frac{(1 - m(s))\, x(t, s)\, q(t, s)}{2k(t, s)}. \tag{8}$$

Wegen der Inseparabilität der Gln. (3), (4) und (7) ist keine analytische Lösung des gekoppelten Gleichungssystems möglich. Eine approximative Lösungsmethode besteht nach [12] darin, eine Steuerung $u_1(t, s)$ vorauszusetzen, mit dieser die Gln. (3) und (4) zu lösen, die Lösung $x_1(t, s)$ in Gl. (7) zu verwenden, was zu $q_1(t, s)$ führt. Aus $H(t, s, x_1, q_1, u)$ läßt sich nun eine nächste Approximation $u_2(t, s)$ für die Steuerung ermitteln.

Abschließend muß bemerkt werden, daß mit existierenden Insektiziden keine beliebige Reduktionsfunktion $u(t, s)$ realisiert werden kann, schon allein deshalb nicht, weil u als stetig in t angesetzt wurde, jedoch nur zu wenigen diskreten Zeitpunkten das Insektizid ausgebracht werden kann. Diese Zeitpunkte sowie die Dosierung lassen sich allerdings in Übereinstimmung mit der Form der Funktion $u(t, s)$ wählen (z. B. den Piks).

3. Zeitdiskrete Steuerung von Räuber-Beute-Systemen

Im Unterschied zu herkömmlichen steuerungstheoretischen Untersuchungen, die zeitkontinuierliche Variable voraussetzen, soll in diesem Abschnitt an einem einfachen Modell die Wirkung zeitdiskreter Steuereingriffe qualitativ betrachtet werden.

Während im vorangegangenen Abschnitt eine Schaderregerpopulation untersucht wurde, die nur der eigenen Dynamik und der Steuerung unterworfen ist, kommt es in praktischen Bekämpfungsfällen häufig vor, daß natürliche Feinde des Schaderregers für eine gewisse Kontrolle von dessen zeitlicher Entwicklung sorgen. Mitunter werden Schaderrregerausbrüche erst durch eine Vernichtung der natürlichen Feinde infolge einer unsachgemäßen Pestizidbehandlung provoziert. Im Agroökosystem Winterweizen wird z. B. die Dynamik der Getreidelaus durch die vorhandenen Marienkäferpopulation mitbestimmt. In erster Näherung läßt sich hier das Phytophagen-Entomophagen-Modell von dem der Kulturpflanze entkoppeln [13] und als ein einfaches Räuber-Beute-System beschreiben:

$$\left.\begin{aligned} \dot{N}_1 &= N_1(a - bN_2) \\ \dot{N}_2 &= N_2(-c + dN_1)\,. \end{aligned}\right\} \tag{9}$$

Hierbei steht N_1 für die Schaderregerabundanz, N_2 für die des Entomophagen. Alle Konstanten sind größer als Null. Das Modell verfügt über drei triviale Gleichgewichtspunkte und über den neutral-stabilen nichttrivialen Gleichgewichtspunkt $(\overline{N}_1, \overline{N}_2)$ mit $\overline{N}_1 = c/d$ und $\overline{N}_2 = a/b$. Es beschreibt ungedämpfte Oszillationen der Abundanzen (geschlossene Trajektorien um $(\overline{N}_1, \overline{N}_2)$ im Phasenraum). Zwei Möglichkeiten der Steuerung sollen berücksichtigt werden: einerseits eine augenblickliche Reduktion der Schaderregeranzahl (z. B. durch einen Pestizideinsatz) und andererseits eine augenblickliche Erhöhung der Entomophagenanzahl (durch Aussetzen von natürlichen Feinden des Schaderregers; biologische Schaderregerbekämpfung). Ziel der Steuerung ist dabei, daß eine gewisse, gerade noch tolerierbare Abundanz der Schaderreger N_1^*, die sogen. Bekämpfungsschwelle, nicht überschritten wird. In [13] wird gezeigt, daß bei einer so formulierten Steuerungsaufgabe zwei wesentliche Fälle zu unterscheiden sind: *Fall 1*: Es gilt $N_1^* > \overline{N}_1$. In diesem Fall kann das System in dem Sinne „stabilisiert" werden, daß es zu keinen Schaderregerausbrüchen (Überschreiten von N_1^*) mehr kommt. Die Amplitude der Schaderregeroszillationen wird dann am meisten verringert, wenn genau bei Erreichen von N_1^* die Abundanz auf $\overline{N}_1$ reduziert wird. Auch bei dieser optimalen Steuerung kann ein mehrmaliger Pestizideinsatz erforderlich sein. Ein zu starker Pestizideinsatz hingegen führt zu verstärkten Schwingungen und bei Wiederholung zu sukzessivem Aussterben des Entomophagen und ständiger Verringerung der Wirksamkeit des Pestizids. Bei einer optimalen biologischen Bekämpfung genügt ein einmaliges Aussetzen der richtigen Anzahl von Entomophagen zu dem Zeitpunkt, zu dem die Schaderregerabundanz $\overline{N}_1$ beträgt, um das System in den Gleichgewichtspunkt $(\overline{N}_1, \overline{N}_2)$ zu bringen. Auch hier kann eine falsche Behandlung zu verstärkten Schwingungen führen.

Fall 2: Es gilt $\bar{N}_1 \geqq N_1^*$. Hier ist keine dauerhafte Vermeidung von Schaderregerausbrüchen möglich, da dies im Widerspruch zur Eigendynamik des Systems steht. Sowohl Pestizideinsatz als auch Aussetzen von Entomophagen müssen periodisch wiederholt werden.

Diese Betrachtungen lassen sich auf Phytophagen-Entomophagen-Systeme übertragen, die nicht durch das Gleichungssystem (9) beschrieben werden. Voraussetzung dafür ist, daß nur ein nichttrivialer Gleichgewichtspunkt $(\bar{N}_1, \bar{N}_2)$ existiert. Ähnliches gilt auch für die Existenz eines Grenzzyklus um den Gleichgewichtspunkt, wobei hier als $\bar{N}_1$ der maximale N_1-Wert auf dem Grenzzyklus zu betrachten ist. Die nachstehende Tafel gibt einen Überblick über die Fälle, in denen es möglich ist, das System im oben genannten Sinne zu stabilisieren:

Tafel. Möglichkeiten der Stabilisierung von Räuber-Beute-Systemen

	$N_1^* > \bar{N}_1$	$\bar{N}_1 \geqq N_1^*$
Gleichgewichtspunkt neutral stabil	ja	nein
Gleichgewichtspunkt stabil	ja	nein
Gleichgewichtspunkt instabil	nein	nein
Grenzzyklus stabil	ja	nein
Grenzzyklus instabil	ja	möglicherweise

Die Möglichkeit der Stabilisierung ergibt sich für einen instabilen Grenzzyklus daraus, daß in dessen Innerem ein stabiler Gleichgewichtspunkt oder ein stabiler Grenzzyklus liegen muß. Das Beispiel der einfachen Räuber-Beute-Modelle zeigt, daß allein durch qualitative Untersuchungen wesentliche Aussagen über mögliche und optimale Steuerungen gewonnen werden können.

Literatur

[1] *Comins, H. N.:* Analytic methods for the management of pesticide resistance. J. Theor. Biol. **77** (1979) pp. 171–188.

[2] *Goh, B. S.; Leitmann, G.; Vincent, T. L.:* Optimal control of a prey-predator system. Math. Biosci. **19** (1974) pp. 263–286.

[3] *Gopalsamy, K.:* Optimal control of age-dependent populations. Math. Biosci. **32** (1976) pp. 155–163.

[4] *Hall, D. C.; Norgaard, R. B.:* On the timing and application of pesticides. Am. J. Agric. Econ. **55** (1973) pp. 198–201.

[5] *Hirata, H.:* Optimal control of nonlinear population dynamics. IEEE-Transactions SMC-**10** (1980) pp. 32–38.

[6] *Holling, C. S.; Jones, D. D.; Clark, W. C.:* Ecological policy design: A case study of forest pest management, in: *Norton, G. A.; Holling, C. S.* (eds.): Proceedings of a conference on pest management, IIASA Laxenburg, CP-77-6 (1977) pp. 13–90.

[7] *Hueth, D.; Regev, U.:* Optimal agricultural pest management with increasing pest resistance. Am. J. Agric. Econ. **56** (1974) pp. 543–552.

[8] *Isaev, A. S.; Chlebopros, R. G.; Nedorezov, L. V.:* Katschestvennyj analis fenomenologitscheskoj modeli dinamiki tschislennosti lesnych nasekomych. Krasnojarsk Preprint ILiD 1979.

[9] *Lee, K. Y.:* Optimal bilinear control theory applied to pest management In: *Mohler, R. R.; Ruberti, A.* (eds.): Recent developments in variable structure systems, economics and biology. Westberlin/Heidelberg/New York: Springer-Verlag 1978.

[10] *Mann, S. H.:* Mathematical models for the control of pest populations. Biometrics **27** (1971) S. 357–368.

[11] *Marchetti, C.:* Wieviel Öl kostet unser täglich Brot? Bild der Wissenschaft (1980) H. 2, S. 40–48.

[12] *Marsolan, N. F.; Rudd, W. C.:* Modeling and optimal control of insect pest populations. Math. Biosci. **30** (1976) S. 231–244.

[13] *Matthäus, E.; Steinmüller, K.:* Zur qualitativen Modellierung von Ökosystemen unter besonderer Berücksichtigung von Agroökosystemen und ihres Stabilitätsverhaltens. Wiss. Zeitschr. der Universität Halle (im Druck).

[14] *Morton, R.:* On the control of stochastic prey-predator models, Math. Biosci. **31** (1976) pp. 341–349.

[15] *Schuhmann, G.:* Zukunftsaussichten des integrierten Pflanzenschutzes. Umschau in Wiss. u. Technik (1979) H. 10, S. 303–311.

[16] *Shoemaker, C.:* Optimization of agricultural pest management. Math. Biosci. **16** (1973) pp. 143–175; **17** (1974) pp. 357–365; **18** (1974) pp. 1–22.

[17] *Talpaz, H.; Borosh, I.:* Strategy for pesticide use. Frequenzcy and applications. Am. J. Agric. Econ. **56** (1974) pp. 769–775.

[18] *Vincent, T. L.; Cliff, E. M.; Goh, B. S.:* Optimal direct control programs for a prey-predator system. Transactions ASME J. Dyn. Syst. Meas. and Control (1974) No. 3, pp. 71–76.

[19] Pest management strategies in crop protection. Vol. I. Washington: US Office of Technology Assessment 1979.

msr 7491

Dr. sc. oec. *H. Gernert*, Berlin[1])

Ökonomische Spiele

IA 6.2.

1. Simulation und ökonomische Spiele

Ökonomische Spiele leisten einen wesentlichen Beitrag zur Erhöhung der Effektivität der Ausbildung und Erziehung, weil durch ihren Einsatz auf der Grundlage umfassender Kenntnisse der ökonomischen Theorie in praxisnaher Form Fähigkeiten und Fertigkeiten der Leitung von Teilbereichen der sozialistischen Wirtschaft entwickelt werden.

Es hat sich gezeigt, daß Mensch-Maschine-Dialogsysteme, die auf der Ausnutzung geeigneter Simulationsmodelle und leistungsfähiger EDV-Anlagen basieren, neue und wirkungsvolle Möglichkeiten für die Durchführung ökonomischer Experimente und für die Qualifizierung von Wirtschaftskadern bieten.

Bei entsprechender Qualität der Abbildung der ökonomischen Realität in einem Modell ist es z. B. möglich, Auswirkungen von Stimulierungsmaßnahmen, Finanzierungsrichtlinien, Planauflagen usw. auf die wirtschaftliche Tätigkeit einer ökonomischen Einheit im Experiment zu erproben und mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit die Reaktion realer Betriebe oder Kombinate auf solche Maßnahmen vorherzusagen.

Erfahrungen mit komplexen betrieblichen Planspielen in der DDR und in anderen sozialistischen Ländern zeigen, daß die in der Praxis tätigen leitenden Wirtschaftskader in solchen Experimenten ähnlich reagieren wie in der Wirklichkeit. Damit wird die Qualität der Experimente im wesentlichen durch die Qualität der eingesetzten Modelle bestimmt. Bei der Ausarbeitung entsprechender Simulationsmodelle werden relevante Eigenschaften realer ökonomischer Prozesse unter Ausnutzung mathematischer Methoden abgebildet, so daß mit dem entstandenen abstrakten Modell beim Einsatz einer EDV-Anlage die realen Prozesse mit hinreichender Genauigkeit nachgeahmt werden können.

Das Modellexperiment führt jedoch nur dann zu neuen Erkenntnissen, wenn die Ähnlichkeit zwischen dem Modell und seinem Original in den relevanten Eigenschaften groß und theoretisch begründet ist. Durch das Modellexperiment wird daher eine

---

[1]) Vortrag anläßlich der 10. Jahrestagung „Grundlagen der Modellierung und Simulation" (8. bis 10. Dezember 1981) in Rostock.
Mitteilung aus der Humboldt-Universität zu Berlin, Sektion Wirtschaftswissenschaften, Bereich Statistik.

sehr enge Verbindung zwischen Theorie und Praxis herbeigeführt.

Die Möglichkeiten der Nutzung von Modellexperimenten in der Ökonomie wurden bisher aufgrund des hohen Vorbereitungsaufwandes, der z. T. noch unzureichenden theoretischen Durchdringung von Prozessen der ökonomischen Praxis und dem noch nicht ausreichenden Vorhandensein von Rechenanlagen mit leistungsfähiger Peripherie zu wenig in Anspruch genommen. Die Simulation ökonomischer Prozesse bietet daher gegenwärtig ein weites Feld von Forschungsaufgaben für alle ökonomischen Disziplinen, die sich dabei auf einen umfassenden Einsatz mathematischer und statistischer Methoden und der elektronischen Datenverarbeitung stützen werden.

2. Zielstellungen für die Erarbeitung von Simulationsmodellen

Ausgangspunkt und wesentliche Grundlage der Simulation ist die Erarbeitung einer Zielstellung für die Arbeit mit dem Modell. Aus ihr ergeben sich die Formulierung des Gegenstandes der Modellierung und die Abgrenzung des ausgewählten Teilbereichs der ökonomischen Realität. Hierbei lassen sich drei gut voneinander abgrenzbare Zielkomplexe feststellen:

- die Vorbereitung von Leitungsentscheidungen in der Wirtschaftspraxis
- die Lösung von Aufgaben der ökonomischen Forschung
- die Unterstützung der Aus- und Weiterbildung leitender Kader.

Der in der Aufgabenstellung zur Anwendung der Simulation vorgegebene Zielkomplex bestimmt entscheidend das im Modell festzulegende Abstraktionsniveau, d. h. den Grad der Übereinstimmung mit der Wirtschaftspraxis.

Den höchsten Grad an Übereinstimmung erfordern Modelle zur Vorbereitung von Leitungsentscheidungen für die verschiedenen volkswirtschaftlichen Leitungsebenen. Hier wäre aber auch mit der höchsten Effektivität dieser Methode zu rechnen. Simulationsmodelle als Bestandteil von automatisierten Systemen der Leitung (ASU) stellen daher sehr hohe Anforderungen an die theoretische Durchdringung der zu leitenden Prozesse als Voraussetzung für deren mathematisch-ökonomische Modellierung.

Der Einsatz zur Unterstützung von Forschungsaufgaben auf ökonomischem Gebiet ist ein zweiter Zielkomplex der Simulation. Bei der Durchführung von Modellexperimenten ergeben sich weitreichende Möglichkeiten einer fruchtbaren Arbeit bei der Untersuchung der Gesetzmäßigkeiten der Entwicklung der sozialistischen Ökonomik. Auch zu diesem Einsatzgebiet der Simulation gibt es noch wenig Erfahrungen. Der gegenwärtige Erkenntnisstand läßt jedoch die Einschätzung zu, daß eine Orientierung auf diese Anwendungsform der Simulation als gerechtfertigt anzusehen ist.

Besondere Merkmale weisen solche Simulationsprozesse auf, mit deren Hilfe die Aus- und Weiterbildung leitender Kader der sozialistischen Wirtschaft unterstützt werden soll. Der hierfür bei der Modellierung zu wählende Abstraktionsgrad ist häufig sehr hoch. Aus pädagogischen Gründen ist darauf zu achten, daß der Zusammenhang zwischen den getroffenen Entscheidungen und der Reaktion des Simulationsprozesses im Spiel deutlich sichtbar gemacht werden kann.

3. Entwicklung und Einsatz ökonomischer Spiele für Aufgaben der Aus- und Weiterbildung

Ökonomische Spiele erleben in ihren unterschiedlichen Formen als Fall- oder Planspiel bzw. als Rollenspiel seit Mitte der 70er Jahre in der Aus- und Weiterbildung von Ökonomen in unserer Republik einen deutlichen Aufschwung.

Unter Fallspiel soll dabei ein solches ökonomisches Spiel verstanden werden, bei dem die Spielteilnehmer in gemeinsamer Diskussion eine konkrete ökonomische Situation (Fallbeispiel) analysieren und mögliche Lösungen bzw. Entscheidungsvarianten aufzeigen.

Demgegenüber sind Planspiele dynamische ökonomische Spiele, bei denen die Spielteilnehmer ihre Entscheidungen anhand der Ergebnisse von Simulationsläufen überprüfen können. Die Dynamik realer ökonomischer Prozesse wird demnach in einem Planspiel durch mehrere Spielperioden realisiert, in denen aufeinanderfolgende Planzeiträume (Quartale, Jahre usw.) simuliert werden. Hierbei handelt es sich um eine Mensch-Maschine-Simulation, da stets von den Spielteilnehmern eine Planungsentscheidung zu treffen ist, die auf eine im Simulationsmodell vorhandene Ausgangssituation angewendet wird. Nach Abschluß des Simulationslaufes in der EDVA und Ausgabe des neuen Zustandes des simulierten Teils der ökonomischen Praxis wird auf diese neue Situation die folgende Entscheidung angewandt. Die Anzahl der nacheinander zu simulierenden Perioden hängt von der Einsatzzielstellung des Planspiels ab.

Sowohl Fall- als auch Planspiele können die Form von Rollenspielen annehmen, wenn die Spielteilnehmer entsprechend der ihnen übertragenen „Rollen“ bestimmte Lestungsfunktionen auszufüllen haben.

Die Entwicklung von Planspielen sollte eine zielgerichtete Auftragsproduktion sein. Die wesentlichen Impulse für ihre Entwicklung müssen daher vom Anwender des Modells ausgehen. Da dieser jedoch häufig nicht in der Lage ist, die Möglichkeiten geeigneter mathematischer Methoden und die entsprechenden Verfahren der Programmierung von EDV-Anlagen einzuschätzen, ergibt sich die Notwendigkeit einer engen Zusammenarbeit von Vertretern verschiedener Wissenschaftsdisziplinen als wichtigste Voraussetzung einer erfolgversprechenden rechenden Arbeit auf diesem Gebiet.

Nach diesen Ausführungen zur Entwicklung von ökonomischen Spielen soll nunmehr zum Stand ihres Einsatzes in Hochschuleinrichtungen der DDR berichtet werden.

Im Dezember 1975 wurde anläßlich der Wissenschaftlich-methodischen Konferenz des Ministeriums für Hoch- und Fachschulwesen (MHF) in Berlin unter der Koordinierung der Wilhelm-Pieck-Universität Rostock eine Zusammenstellung von Planspielen und Lehrmodellen gezeigt.

Eine umfassende aktuelle Übersicht über den Stand des Einsatzes in Einrichtungen des Hochschulwesens der DDR gab es jedoch nicht. Im Rahmen einer Arbeitsgruppe „Rechnergestützte Planspiele“ haben daher Mitarbeiter der Universitäten Rostock und Jena, der Technischen Universität Dresden, der Bergakademie Freiberg, der TH Leuna-Merseburg, der IH Zittau und der IH Warnemünde-Wustrow unter Koordinierung der Humbolt-Universität zu Berlin im Jahre 1977 eine Nomenklatur zur Beschreibung aktivierender Lehrmethoden entwickelt. Es wurde hierbei versucht, wesentliche Merkmale und Eigenschaften, insbesondere von rechnergestützten Planspielen, systematisch darzustellen. Auf der Grundlage dieser Nomenklatur wurden von allen wirtschaftswissenschaftlichen Hochschuleinrichtungen der DDR Informationen bereitgestellt, die eine Übersicht über den Stand der Entwicklung und des Einsatzes von Planspielen für die Aus- und Weiterbildung von Wirtschaftskadern zulassen. Die erarbeitete Zusammenstellung wird seither ständig aktualisiert.

Es zeigt sich, daß neben Planspielen auch andere aktivierende Lehrmethoden eingesetzt werden, wie Fall- und Rollenspiele oder Lehrexperimente. Etwa die Hälfte der gemeldeten Spiele setzt die Nutzung der elektronischen Datenverarbeitung voraus.

4. Nachnutzung als effektive Form des Einsatzes komplexer Spiele

Als sehr erfreulich konnte festgestellt werden, daß die Mehrzahl der in der Informationszentrale der Friedrich-Schiller-Universität Jena vorliegenden Spiele einer Nachnutzung in anderen Einrichtungen der Aus- und Weiterbildung zur Verfügung stehen. In der Nachnutzung vorhandener Modelle liegen bei dem hohen Aufwand, der bei der Entwicklung eines Planspiels zu tragen ist, große Reserven zur Intensivierung des Einsatzes dieser sehr effektiven Lehrmethode.
Am Beispiel eines betrieblichen Simulationsmodells, das das z. Z. am häufigsten in Hochschuleinrichtungen und Institutionen der Weiterbildung leitender Kader der Industrie und des Bauwesens der DDR eingesetzte Planspiel ist, lassen sich die Vorzüge der Nachnutzung deutlich herausarbeiten.
Das in den Jahren 1970—1973 im Bereich Statistik der Sektion Wirtschaftswissenschaften der Humboldt-Universität zu Berlin entwickelte rechnergestützte Planspiel BES 1 war das erste Modell in der DDR, durch dessen Einsatz komplexe Prozesse eines betrieblichen Reproduktionsprozesses in ihrer Dynamik mit der Zielstellung simuliert werden konnten, betriebswirtschaftliche Zusammenhänge und Grundproportionen praxisnah für Aufgaben der Aus- und Weiterbildung zu untersuchen [1].
Der Einsatz des Modells BES 1 erfolgte zunächst an der Sektion Wirtschaftswissenschaften der Humboldt-Universität zu Berlin. Nach Demonstration des Spiels im Rahmen des Wissenschaftlichen Beirats für Wirtschaftswissenschaften beim MHF (Arbeitsgruppe Lehrmittel) und während der Wissenschaftlich-methodischen Konferenz des MHF (Berlin, Dezember 1975) entstand der Wunsch einer Übernahme und des Einsatzes in mehreren weiteren Einrichtungen des Hochschulwesens der DDR. Dieses Interesse ergab sich dabei aus der Breite der im Spielverlauf darstellbaren betriebswirtschaftlichen Problemstellungen, der hohen Flexibilität des für die Modellierung ausgewählten Algorithmus sowie der großen Zuverlässigkeit des erarbeiteten Rechnerprogramms.
Das Modell BES 1 wurde in einer R 300-Variante entwickelt und liegt jetzt in einer PL/1-Variante für ESER-Rechner in einer wahlweise deutsch-, russisch- oder englisch-sprachigen Version vor. Aus 36 Eingabeinformationen (Entscheidungen) für einen Betrieb und ein Quartal werden unter Berücksichtigung von etwa 80 aus der Vorperiode übernommenen Angaben sowie von etwa 170 im Modell enthaltenen Parametern und normativen Größen etwa 450 Daten berechnet, die die Situation des Betriebes nach Ablauf des simulierten Zeitraums kennzeichnen.
Der zeitliche Aufwand für die Entwicklung des Modells lag bei etwa 6 Mannjahren, zuzüglich zeitweilig eingesetzter Kapazitäten (Diplomarbeiten, Forschungsberichte usw.) sowie von beratenden Leistungen von Konsultanten in Forschung und Industriepraxis. Die Kosten für Projektierung, Programmierung und Testung der Programme betrugen rd. 362000,— Mark.

Der lange Entwicklungszeitraum und die hohen Kosten haben bisher einen umfassenden Einsatz komplexer rechnergestützter Planspiele verhindert. Einen wesentlichen Effektivitätsgewinn erreichten Hochschuleinrichtungen der DDR daher über den Weg der Nachnutzung des existierenden Modells BES 1.

Bis Ende 1980 wurde eine Übergabe aller Projektdokumentationen, Programme und Spielanleitungen kostenlos auf den Grundlagen von Nachnutzungsverträgen an 3 weitere Sektionen der Humboldt-Universität zu Berlin, 15 andere Universitäten, Hoch- und Fachschulen der DDR sowie 4 Einrichtungen der Weiterbildung leitender Kader der Wirtschaftspraxis realisiert.

Die Auswertung der Umfrage über den Stand der Entwicklung und des Einsatzes von Planspielen an DDR-Hochschuleinrichtungen hat ergeben, daß sich aus der Anzahl der gemeldeten

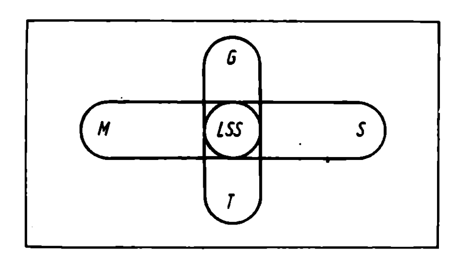


Bild
Interdisziplinärer Charakter von LSS

Fall- und Planspiele einige für eine Nachnutzung in anderen Hochschuleinrichtungen besonders eignen.
Nach Aussprachen mit den Autoren bzw. nach Einsichtnahme in die vorhandenen Dokumentationen empfehlen die Mitglieder der Arbeitsgruppe Rechnergestützte Planspiele die folgenden Modelle für einen umfassenden Einsatz in solchen Bildungseinrichtungen, deren inhaltliches Profil mit der Aufgabenstellung der Spiele übereinstimmt.
Nähere Angaben zu diesen Modellen können in der Informationszentrale „Ökonomische Spiele" eingesehen werden, die im Ökonomischen Labor der Sektion Wirtschaftswissenschaften der Friedrich-Schiller-Universität Jena eingerichtet worden ist. Sie können auch direkt bei den Autoren angefordert werden. Die angegebene Registrier-Nr. bezieht sich auf die laufende Nummer, unter der das Spiel in der Gesamtzusammenstellung der Informationszentrale in Jena aufgeführt ist.

Spiele zu betriebswirtschaftlichen Teilprozessen

— VEFL — Verflechtungsmodelle, Technische Universität Dresden (TUD), Sektion Sozialistische Betriebswirtschaft (SBW), Reg.-Nr. 34
— ZEKO — Zeit- und Kostenrechnung von Netzplänen, TUD, Sektion SBW, Reg.-Nr. 35
— LOPT — Linearoptimierungs — Modelle zur Produktionsplanung, TUD, Sektion SBW, Reg.-Nr. 36
— SILA — Simulation einfacher Lagerhaltungsprozesse, TUD, Sektion SBW, Reg.-Nr. 38
— Simulation der betrieblichen Materialdisposition, TUD, Sektion SBW, Reg.-Nr. 45

Spiele zu komplexen betrieblichen Prozessen

— Sozialistische Rationalisierung, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Sektion Wirtschaftswissenschaften (WiWi), Reg.-Nr. 2
— Ausarbeitung einer Intensivierungskonzeption, TH „Carl Schorlemmer" Leuna-Merseburg, Institut für Sozialistische Wirtschaftsführung (ISW), Reg.-Nr. 4
— Vorbereitung von Entscheidungen zur langfristigen Entwicklung eines Kombinates, TH „Carl Schorlemmer" Leuna-Merseburg, ISW, Reg.-Nr. 5
— Komplexe Optimierung eines Betriebsplanes, TH „Carl Schorlemmer" Leuna-Merseburg, Sektion WiWi, Reg.-Nr. 21
— Erarbeitung eines Jahresplanes für einen Industriebetrieb, TH „Carl Schorlemmer" Leuna-Merseburg, Sektion WiWi, Reg.-Nr. 22
— Betriebliches Simulationsmodell (BES 1), Humboldt-Universität zu Berlin, Sektion WiWi, Reg.-Nr. 40

Spiele zu volkswirtschaftlichen Prozessen

— Ausarbeitung eines Volkswirtschaftsplanes, Martin-Luther-Universität Halle, Sektion WiWi, Reg.-Nr. 14
— Gestaltung Exportstruktur, Hochschule für Ökonomie „Bruno Leuschner", Berlin, Sektion Außenwirtschaft, Reg.-Nr. 27.

5. Leitungssimulationsspiele

Aus den wachsenden Anforderungen an die Leitung der sozialistischen Wirtschaft ergeben sich höhere Ansprüche an die Wirksamkeit und die Gestaltung ökonomischer Spiele.

In der Zusammenarbeit sozialistischer Länder erlangt daher in der letzten Zeit eine bestimmte Art der ökonomischen Spiele, die als Leitungs-Simulations-Spiele (LSS) bezeichnet werden, verstärkte Aufmerksamkeit. Dieses LSS ersetzen nicht andere Arten von Spielen, sondern schließen eine wichtige Lücke, weil sie vollständig aus den Erfordernissen der sozialistischen Leitung verschiedener volkswirtschaftlicher Leitungsebenen konzipiert werden. Sie zeigen sich als interdisziplinäre Form der Untersuchung und Darstellung komplexer ökonomischer Vorgänge besonders gut geeignet und werden daher in den kommenden Jahren von größerer Bedeutung sein.

Leitungssimulationsspiele erfordern die Inanspruchnahme von Erkenntnissen aus mehreren Wissenschaftsdisziplinen. Unter der Zielstellung der Entwicklung eines LSS sind folgende Aspekte zu berücksichtigen (Bild):

— die Auswahl des Gegenstandsbereiches des Spiels (G), d. h. eines der Zielstellung des Spiels entsprechenden Ausschnitts der ökonomischen Praxis
— Fragen der Modellierung und Simulation des gewählten ökonomischen Prozesses (M)
— die Rolle des Menschen im Spiel (S)
— Möglichkeiten der technischen Realisierung des Spielablaufs (T).

Die Auswahl des Gegenstandsbereiches des Spiels dominiert gegenüber den anderen Aspekten. Auf Grund der Wechselwirkung zwischen der Zielstellung, unter der jedes Spiel durchgeführt werden soll, und den für die Spielrealisierung einzusetzenden Mitteln der Modellierung und Rechentechnik setzen sich in der Praxis stets solche Spiele erfolgreich durch, die unter einer klaren inhaltlichen und didaktischen Entwicklungskonzeption erarbeitet worden sind.

Als Gegenstandsbereich werden dabei ganz unterschiedliche Ausschnitte der Wirtschaftspraxis gewählt, wie die Volkswirtschaft als Gesamtheit, Industriezweige oder Kombinate, Betriebe oder Teile von Betrieben. Auch volkswirtschaftliche oder betriebliche Querschnittsaufgaben dienen als Gegenstand ökonomischer Spiele (Außenwirtschaft, Finanzen, Investitionen usw.).

Um die Dynamik des gewählten Gegenstandsbereiches im Spiel nachahmen, d. h. simulieren zu können, sind unter Einsatz geeigneter Methoden der Modellierung alle relevanten Eigenschaften des zu untersuchenden Ausschnitts der Wirtschaftspraxis im Simulationsmodell widerzuspiegeln. Von besonderer Bedeutung ist hierbei das Abstraktionsniveau bei der Beschreibung der realen Prozesse, das von den Einsatzzielen des Spiels determiniert wird. Aus den Erfahrungen der existierenden Modelle läßt sich ableiten, daß gerade die Frage, welche Zusammenhänge in das Modell aufzunehmen sind und welche Bedingungen vernachlässigt werden können, besonders schwer zu beantworten ist.

Weiterhin zwingt der zum Teil mehrjährige Aufwand für die Entwicklung der Modelle zu solchen Konzeptionen, die eine Anpassung des Modellalgorithmus an veränderte Umweltbedingungen begünstigen und somit eine lange Einsatzzeit der Spiele gewährleisten.

Damit ist die sichere Beherrschung der Methoden und Verfahren der ökonomisch-mathematischen Modellierung eine wichtige Voraussetzung, um die modellseitige Basis für leistungsfähige LSS schaffen zu können.

In Leistungssimulationsspielen steht der handelnde Mensch im Mittelpunkt des Interesses. Die Teilnehmer können in die Rollen des Lernenden, Lehrenden oder Forschenden schlüpfen und im Spiel bei hinreichender Komplexität des Gegenstandsbereiches ganz unterschiedliche Formen der Zusammenarbeit entwickeln. So lassen sich Entscheidungssituationen unter mehr oder weniger großer Ungewißheit simulieren, die Teilnehmer können Bedingungen des sozialistischen Wettbewerbs vorfinden oder sich im Rollenspiel innerhalb von Leitungshierarchien bewegen (insbesondere bei Mehrebenenplanspielen). Für die materiell-technische Realisierung von LSS werden, bedingt durch die Komplexität dieser Spiele sowie durch die hohe Dynamik der nachzuahmenden ökonomischen Vorgänge, überwiegend EDV-Anlagen als Prozeßsimulatoren eingesetzt. Mit oft sehr viel geringerem Aufwand lassen sich jedoch auch andere Wege beschreiten, um zu leistungsfähigen Spielmodellen zu gelangen. Tabellen, Nomogramme oder auch maßstabgetreue physische Modelle realer Industrieanlagen werden erfolgreich in ökonomischen Spielen genutzt.

In den kommenden Jahren werden jedoch die Möglichkeiten des Mensch-Maschine-Dialogs auch in LSS stärkere Bedeutung gewinnen. Die peripheren Geräte der Großrechenanlage oder des leistungsfähigen Kleinrechnersystems übernehmen dann neben der Funktion des Prozeßsimulators zusätzlich die Aufgabe, als Hilfsmittel für die Entscheidungsvorbereitung zu dienen. Welche Formen der technischen Realisierung von LSS zu wählen sind, wird weitgehend von den Ausbildungszielen der jeweiligen Hochschuleinrichtung sowie den vorhandenen technischen Möglichkeiten bestimmt werden.

6. Einige Entwicklungstendenzen

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß sich für die kommenden Jahre folgende Tendenzen für die Entwicklung und den Einsatz ökonomischer Spiele abzeichnen:

- Die Erschließung neuer Anwendungsgebiete für ökonomische Spiele setzt sich fort.
- Die Struktur der Planspiele ändert sich. Der Aktionsbereich der Spiele, d. h. die durch die Teilnehmer zu repräsentierenden Leitungsebenen, spiegeln stärker als bisher die Vielfalt und Komplexität realer Leitungsprozesse wider. Als Ergebnis werden in immer größerem Umfang Leitungssimulationsspiele entwickelt. Eine solche Planspielkonzeption vereinigt die Vorteile eines in seiner Dynamik simulierten Reproduktionsprozesses mit den Möglichkeiten der Zusammenarbeit von Leitungskadern in der Form des Rollenspiels.
- Die Bedeutung der Rechentechnik zur Realisierung der in den Spielen zu simulierenden ökonomischen Prozesse nimmt weiter zu. Die Großrechentechnik des ESER, aber auch leistungsfähige Kleinrechnersysteme, schaffen die für einen Mensch-Maschine-Dialog erforderlichen technischen Voraussetzungen. Die immer stärkere Integration der EDV in den unmittelbaren Leistungsprozeß wirkt sich auch auf die technischen Mittel aus, die zur Realisierung von Planspielen eingesetzt werden.
- In Einrichtungen der Weiterbildung leitender Kader der Wirtschaftspraxis erhöht sich der Bedarf an aktivierenden Lehrmethoden. Aufgrund ihrer breiten Aussagekraft stehen komplexe rechnergestützte Planspiele hierbei im Mittelpunkt eines ständig wachsenden Interesses. Für die an der Entwicklung solcher Modelle beteiligten Hochschuleinrichtungen bedeutet das, der Praxisrelevanz ihrer Spiele schon während der Entwicklungszeiten große Aufmerksamkeit zu widmen.

Während also der Einsatz von Simulationsmodellen für Aufgaben der Lehre in der Form von Planspielen bereits gute Erfolge gebracht hat, sind zur Lösung von Forschungsaufgaben oder bei der Entscheidungsvorbereitung in der Leitung realer wirtschaftlicher Prozesse noch weitere umfangreiche und langfristig orientierte Untersuchungen durchzuführen.

Literatur

[1] *Gernert, H.; Kölzow, W.:* Betriebliches Simulationsmodell BES 1 — Planspiel zur Aus- und Weiterbildung von Wirtschaftswissenschaften. Humboldt-Universität zu Berlin, Sektion Wirtschaftswissenschaften, Bereich Statistik (Modellbeschreibung) 1974.

msr 7490

Dr.-Ing. *E. Klett*, Dresden [1])

Untersuchungen zur Bestimmung mathematischer Modellansätze bei Regressionsanalysen

IA 1.1.6.0.

0. Einleitung

Zur Auswertung und mathematischen Darstellung meßtechnischen Datenmaterials werden die Methoden der Regressionsanalyse sehr häufig angewendet. Die Literatur zur Regressionsanalyse und Versuchsplanung beschränkt sich jedoch meist nur auf die Behandlung der *mathematischen* Problematik, die für den Anwender sehr gut aufbereitet ist. Nicht oder nur äußerst oberflächlich untersucht wurde dagegen die Begründung der Modellansätze, wobei darunter die Bestimmung der abhängigen und unabhängigen Variablen verstanden werden soll. Die Lösung dieser Aufgabenstellung, zu der die vorliegende Arbeit einen Beitrag liefern soll, ist für die praktische Brauchbarkeit des erhaltenen mathematischen Modells von ausschlaggebender Bedeutung; denn der Modellansatz ist nicht irgendein nach Zweckmäßigkeitsforderungen auszuwählendes mathematisches Gebilde, sondern er muß den abzubildenden Sachverhalt richtig darstellen. Nur ein *wahres* mathematisches Modell ist für theoretische und praktische Belange brauchbar. Es ist besonders zu beachten, daß der Modellansatz nicht allein aus den Meßwerten der entsprechenden Meßgrößen abgeleitet werden kann (s. [1] bis [3]). Die Experimentiermethode wurde bisher nicht, zumindest nicht bewußt, als bestimmender Faktor für die Struktur des Modellansatzes erkannt. Nur an der Art und Weise, wie Meßwerte in einem aktiven oder passiven Experiment gewonnen werden, kann man feststellen, was die unabhängigen und was die abhängigen Variablen sind. Diese Information läßt sich allein aus der Kenntnis der Meßwerte nicht gewinnen. Es wird hier demnach nicht die Frage nach der mathematischen Form des Modells erörtert, also ob z. B. ein Polynom 3. Grades oder ein Exponentialansatz zu verwenden ist, sondern es soll ermittelt werden, wie aus den Meßwerten von K Einflußgrößen und einer Zielgröße die abhängigen und die unabhängigen Variablen zu bilden sind. Dabei wird sich zeigen, daß im allgemeinen Fall nicht K, sondern $K + 2$ unabhängige Variable aus diesen $K + 1$ Meßgrößen abgeleitet werden können.

Den Ausgangspunkt für die hier darzulegenden Untersuchungen bildet eine technologische Aufgabenstellung: Die bessere Beherrschung technologischer Prozesse erfordert in gewissen Fällen die Verwendung eines mathematischen Modells der diesen Prozessen zugrunde liegenden Zusammenhänge. Es zeigte sich bei der Bearbeitung dieser Aufgabe, daß die Problematik der mathematischen Modellierung und insbesondere die der begründeten Ableitung des Modellansatzes aus den empirischen Tatsachen Mittel und Methoden erfordern, die über den Rahmen der bisher bei der mathematischen Modellierung üblichen hinausgehen. Das betrifft vor allem die empirische Definition des Begriffs „Zusammenhang“. Der Inhalt dieses Begriffs muß *unabhängig* von der Verwendung mathematischer Methoden festlegbar sein; denn der Nachweis der Existenz eines Zusammenhangs ist nicht dadurch erbracht, daß man eine Menge von Meßdaten durch eine beliebige mathematische Funktion darstellt und diese Funktion dann „Zusammenhang“ nennt. Die richtige Vorgehensweise besteht darin, daß man zuerst anhand empirischer Merkmale entscheidet, ob Zusammenhänge vorliegen, und wenn dies gewährleistet ist, kann man dann diese Zusammenhänge in einem mathematischen Modell (das in diesen Fällen eine Funktion sein muß) darstellen. Wie bei der mathematischen Darstellung von Zusammenhängen vorzugehen ist und welche Aufgabe speziell der Regressionsanalyse zukommt, soll im folgenden erläutert werden.

1. Zusammenhang

Mit „Zusammenhang“ bezeichnet man eine Eigenschaft, die zwischen zwei Erscheinungen besteht. Zum Ausdruck kommt diese Eigenschaft dadurch, daß im Bildbereich *wiederholt* die Abbilder der beiden Erscheinungen einander eindeutig zugeordnet sind. Hat also die eine Erscheinung das Abbild A_1 und die andere A_2 und stellt man bei Wiederholung der Beobachtung fest, daß dem Abbild A_1 stets empirisch eindeutig das Abbild A_2 zugeordnet ist, d. h. $A_1 \rightarrow A_2$, so wird diese Eigenschaft mit dem Begriff „Zusammenhang“ bezeichnet. Das Abbild A_1 heiße „vorderes“ und A_2 „hinteres“; die abgebildeten Erscheinungen seien dementsprechend „vordere“ und „hintere“ genannt.

Es ist bei dieser Definition besonders hervorzuheben, daß A_1 und A_2 keine Variablen darstellen, sondern Abbilder *einzelner* Erscheinungen. Die Zuordnung $A_1 \rightarrow A_2$ unterscheidet sich beispielsweise von der Zuordnung der Stromstärke I und der Spannung U für einen gegebenen Widerstand $R = 5\,\Omega$ $U \rightarrow I$, die mathematisch darstellbar ist als $U = I \cdot 5\,\Omega$. Mit $A_1 \rightarrow A_2$ sind Zuordnungen gemeint, wie z. B. 3 A → 15 V, 2,8 A → 14 V usw.

Die symbolische Zuordnung $A_1 \rightarrow A_2$ bezeichnet deshalb *einzelne* Zusammenhänge, während $U = I \cdot 5\,\Omega$ die mathematische Darstellung einer *Menge* solcher einzelner Zusammenhänge ist. Die Unterscheidung von „einzelnen Zusammenhängen“ und einer „Menge von Zusammenhängen“ ist für die Untersuchung und das Verständnis mathematischer Darstellungen von großer Wichtigkeit. Identifizierbar sind stets nur einzelne Zusammenhänge für sich und nicht Mengen von Zusammenhängen insgesamt genommen. Deshalb müssen die einzelnen Zusammenhänge, wie z. B. 3 A → 15 V und 2,8 A → 14 V, jeder für sich als wiederholbar empirische Zuordnungen nachgewiesen werden, ehe eine Menge von ihnen als ein mathematisches Modell, wie z. B. $U = I \cdot 5\,\Omega$, dargestellt werden kann.

Wesentlich an der Definition des Begriffs „Zusammenhang“ ist die Wiederholbarkeit der empirischen Zuordnung $A_1 \rightarrow A_2$. Stellt man ein gemeinsames Auftreten zweier Abbilder nur einmalig fest, so läßt sich noch nicht auf einen Zusammenhang schließen. Die beiden gemeinsam beobachteten Erscheinungen können dann ebensogut voneinander unabhängig sein. Erst wenn bei mehrmaliger Beobachtung bei Vorliegen des einen (vorderen) Abbildes auch stets das andere (hintere) vorliegt, ist das gemeinsame Auftreten dieser beiden Abbilder objektiv begründet und wird „Zusammenhang“ genannt.

3. Kausalzusammenhang

Die Analyse technologischer Prozesse sowie die Bildung und Anwendung mathematischer Modelle zur besseren Beherrschung dieser Prozesse erfordert die empirische Identifizierbarkeit *kausaler* Zusammenhänge; denn Steuerung eines technologischen Prozesses bedeutet, diejenige Ursache (Steuereinwirkung) zu finden, deren Wirkung das geforderte Steuerziel ist. Jeder

[1]) Mitteilung aus der TU Dresden, Sektion Elektronik-Technologie und Feingerätetechnik, WB Elektronik-Technologie.

Steuerung von technologischen Prozessen liegen demnach *erkannte* Kausalzusammenhänge zugrunde.

Die charakteristische Eigenschaft von Kausalzusammenhängen besteht darin, daß die Änderung einer Erscheinung die Änderung einer anderen hervorrufen kann. Dies kommt insbesondere bei aktiven Experimenten zum Ausdruck, in denen man eine Erscheinung *bewußt* ändert und die Änderung einer anderen beobachtet. Führt man die gleiche Änderung wiederholt aus und beobachtet man stets wieder die gleiche Reaktion bei der anderen Erscheinung, so liegt ein Zusammenhang vor, der wegen seiner charakteristischen Eigenschaft *kausal* genannt wird.

Bei den weiteren Betrachtungen wird vorausgesetzt, daß die Abbildung der vorderen und hinteren Erscheinung durch Meßgrößen erfolgen kann. Zur Abbildung der hinteren Erscheinung bei Kausalzusammenhängen wird die Meßgröße Z, die *Zielgröße*, verwendet. Zur Abbildung desjenigen Teils der vorderen Erscheinung, dessen Änderung *aktiv* die Änderung der hinteren Erscheinung hervorruft, werden die Meßgrößen $E_1, \dots, E_K$, die *Einflußgrößen*, verwendet. Im vorderen Abbild ist i. allg. auch ein Meßwert der Zielgröße Z enthalten. Dieser Meßwert von Z bildet einen Teil der vorderen Erscheinung ab, der nur *passiv* auf die hintere Erscheinung einen Einfluß hat (vgl. Zuordnung (1)).

Die Gesamtheit der Momentanwerte $E_1(t), \dots, E_K(t)$, die zum Zeitpunkt t vorliegen, wird zusammengefaßt zu $(E_1, \dots, E_K, Z)_t$ und mit dem Begriff „Zustand zum Zeitpunkt t" bezeichnet. „Stationär" heiße ein Zustand dann, wenn für alle δt, $0 < \delta t \leqq \delta t^*$, gilt $(E_1, \dots, E_K)_t = (E_1, \dots, E_K, Z)_{t+\delta t}$, wobei δt^* ein endliches Zeitintervall ist. δt^* muß deshalb endlich sein, damit die Stationarität *empirisch* nachweisbar ist.

Geht man von einem zum Zeitpunkt 0 stationären Zustand, der mit $(E_1, \dots, E_K, Z)_{t \leq 0}$ bezeichnet sei, aus und ändert man die Einflußgröße $E_u \in \{E_1, \dots, E_K\}$, so wird sich auch Z ändern. Es läßt sich anhand empirischer Tatsachen belegen, daß die wiederholbar eindeutige Zuordnung in diesen Fällen die Form

$$\left[\Delta E_u(\tau)\Big|_0^t, E_1(t \lesssim 0), \dots, E_K(t \lesssim 0), Z(t \lesssim 0)\right] \to \Delta Z(t) \quad (1)$$

hat (vgl. [4]), wobei gilt

$$\Delta E_u(\tau) \equiv E_u(\tau) - E_u(t \lesssim 0) \quad \text{und}$$
$$\Delta Z(t) \equiv Z(t) - Z(t \lesssim 0)\,.$$

Die Zuordnung (1) ist die allgemeine Form von Kausalzusammenhängen.

Die Menge aller Zuordnungen (1), die man durch die Variation der Werte von $E_1(t \lesssim 0), \dots, E_K(t \lesssim 0)$, $Z(t \lesssim 0)$ und $\Delta E_u(\tau)\Big|_0^t$ erhält, läßt sich durch das mathematische Modell

$$\Delta Z(t) = f\left\{F\left[E_u(\tau)\Big|_0^t\right], E_1(t \lesssim 0), \dots, E_K(t \lesssim 0), Z(t \lesssim 0)\right\} \quad (2)$$

darstellen. Gleichung (2) ist die mathematische Darstellung der Menge von Kausalzusammenhängen, die mit Hilfe der Meßgrößen $E_1, \dots, E_K$ und Z abbildbar ist. Aus den $(K + 1)$ Meßgrößen $E_1, \dots, E_K$, Z lassen sich $(K + 2)$ voneinander unabhängige Variable bilden. Eine besondere Stellung nimmt dabei die Variable $\Delta E_u(\tau)\Big|_0^t$ ein, da sie eine Folge von Meßwerten im Zeitintervall $[0, t]$ darstellt; sie wird „*Ursache*" genannt. Die abhängige Variable $\Delta Z(t)$ heißt „*Wirkung*", und die unabhängigen Variablen $E_1(t \lesssim 0), \dots, E_K(t \lesssim 0)$, $Z(t \lesssim 0)$ werden als „*Bedingungen*" bezeichnet.

Gleichung (2) ist die Grundform jeder mathematischen Darstellung von Zusammenhängen.

3. Regressionsgleichung aus mathematischer Sicht

Eine Regressionsgleichung stellt die eindeutigen Zuordnungen zwischen Werten von M unabhängigen Variablen $x_1, \dots, x_M$ und einer von diesen abhängigen Variablen y dar. Bei mathematischen Betrachtungen nimmt man an, daß die Funktion f,

$$y = f(x_1, \dots, x_M)\,, \quad (3)$$

den gegebenen Zusammenhang richtig abbildet [1] bis [3]. Zur Ermittlung von Gl. (3) steht i. allg. nur eine endliche Anzahl von Punkten $P_i = (x_{1i}, \dots, x_{Mi}, y_i)$ zur Verfügung $(i = 1, \dots, N$; N ist die Anzahl der Punkte im $(M + 1)$-dimensionalen Raum). Die Gl. (3) kann demnach nur genähert ermittelt werden. Bei der Regression (genauer: der Regression zweiter Art) geht man von einem Polynomansatz aus, dessen Grad geeignet gewählt wird:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_M x_M + b_{M+1} x_1 x_2 + \dots \quad (4)$$

Die Berechnung der Regressionskoeffizienten b_i $(i = 0, 1, \dots)$ erfolgt mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate, da die Anzahl N der gegebenen Punkte P_i in der Regel größer ist als die Anzahl der zu ermittelnden Regressionskoeffizienten (Ausgleichkurve). Ein zweiter Grund für die Verwendung der genannten Methode ist der, daß durch die Werte der unabhängigen Variablen $x_{1i}, \dots, x_{Mi}$ der dazugehörige Wert y_i der abhängigen Variablen nur im Mittel bestimmt ist, d. h., die abhängige Variable weist statistische Schwankungen auf bei gleichen Werten der $x_1, \dots, x_M$.

Die übliche Methodik der Regressionsanalyse nimmt also an, daß von jeder Meßgröße genau *ein* Meßwert in jeden einzelnen Zusammenhang eingeht (s. Gl.(3)). Vergleicht man diese Annahme z. B. mit der mathematischen Darstellung derjenigen Zusammenhänge, die ein lineares System realisieren kann, so sieht man sofort, daß von der Einflußgröße „Eingangsspannung" (u_1) nicht genau ein Meßwert in den Zusammenhang als vorderes Abbild eingeht, sondern ein ganzer zeitlicher Verlauf:

$$u_2(t) = \int_0^t g(t - \tau)\, u_1(\tau)\, d\tau\,. \quad (5)$$

Angenommen, die Zusammenhänge linearer Systeme und ihre mathematische Darstellung wären noch nicht erkannt und man wollte die im Experiment für ein solches System erhaltenen Meßdaten von u_1 und u_2 mit dem Modellansatz $u_2 = f(u_1)$ nach der üblichen Methodik der Regressionsanalyse mathematisch darstellen, so würde man kein *reproduzierbares*, d. h. kein *wahres* mathematisches Modell erhalten. (Dieser Modellansatz wäre schon deshalb unbrauchbar, weil er nicht angibt, zu welchen Zeitpunkten (bezogen auf einen Bezugszeitpunkt) die Meßwerte von u_1 und u_2 zu nehmen sind).

4. Wahrheitskriterium mathematischer Darstellungen

In der Literatur zur Regressionsanalyse [1] bis [3] werden vorrangig nur mathematische Probleme behandelt, wie z. B. die Bestimmung der Regressionskoeffizienten, die Ermittlung optimaler Versuchspläne zur Vereinfachung der Berechnung der Regressionsgleichung, die Testung und der Vergleich der Koeffizienten usw. Dadurch entsteht beim Anwender dieser Methoden der Eindruck, als würden die mathematischen Methoden eine Entscheidung über den Wahrheitsgehalt des Regressionsmodells erlauben. Diese Vorstellung ist jedoch falsch. Mathematisch lassen sich die verschiedensten Kriterien formulieren (z. B. Optimalitätskriterien von Versuchsplänen, Signifikanzkriterien usw.), es gibt jedoch kein mathematisch formulierbares Wahrheitskriterium. Die Entscheidung über die *Wahrheit* einer Regressionsgleichung muß empirisch erfolgen, sie ist ein Teil der Versuchsmethodik. Die mathematische Dar-

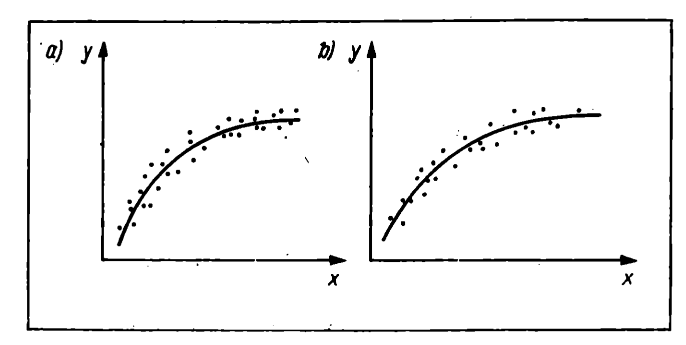


Bild 1. Resultat der Regressionsanalyse
a) erstes Experiment; b) zweites Experiment

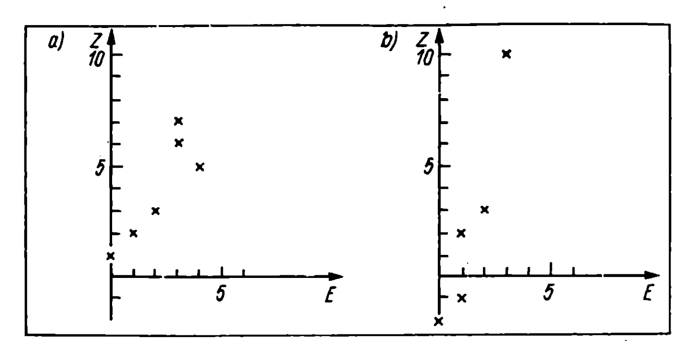


Bild 2. Darstellung der Meßdaten für die beiden Meßgrößen Z und E
a) erstes Experiment; b) zweites Experiment

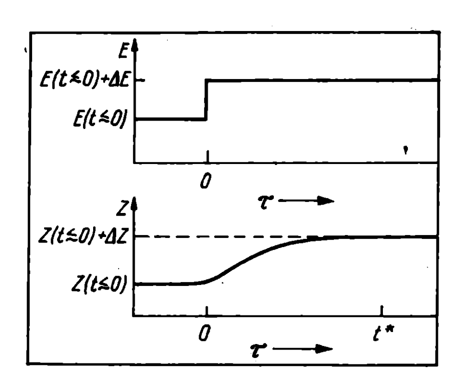


Bild 3. Experimentiermethodik zur Erlangung der im Bild 2 dargestellten Werte

stellung einer Menge von Zusammenhängen ist dann wahr, wenn sie bei beliebigen Wiederholungen die abhängige Variable richtig aus den unabhängigen Variablen zu berechnen gestattet, d. h., wenn die Berechnung das gleiche wie die Messung ergibt (im Rahmen der Meßgenauigkeit).

Anhand von Bild 1 läßt sich die Methodik zur Feststellung des Wahrheitsgehaltes beschreiben. Die linke Kurve zeigt das Resultat der Regressionsanalyse bei der ersten Durchführung des Experimentes (es sei ein zweidimensionales Problem betrachtet). Die in diesem Experiment erhaltene Regressionsgleichung $y = f(x)$ ist genau dann wahr, wenn jede beliebige Wiederholung des Experimentes das gleiche Resultat liefert (bis auf unwesentliche Abweichungen). (Diese Methodik entspricht der angegebenen Definition einer wahren mathematischen Darstellung.) Nur wenn diese Eigenschaft des mathematischen Modells nachweisbar ist, ist es praktisch verwendbar. Es kann dann nach seiner empirischen Bestimmung zu beliebigen späteren Zeitpunkten zur Berechnung der abhängigen Variablen aus gegebenen Werten der unabhängigen bzw. zur Berechnung der unabhängigen Variablen aus gegebenen Werten der abhängigen verwendet werden. Die berechneten Werte stimmen dann mit den tatsächlich vorliegenden Werten bei der praktischen Realisierung des betrachteten Zusammenhangs überein.

Die Definition des Begriffs „Zusammenhang" und die allgemeine Darstellung eines Kausalzusammenhangs (Zuordnung (1)) gehen aber gerade davon aus, daß die Zuordnung von vorderem und hinterem Abbild *wiederholbar* eindeutig sein muß. Sie beinhalten also schon die Eigenschaft, die von den in einem mathematischen Modell zusammengefaßten Zuordnungen gefordert wird, damit das Modell *wahr* ist. Gleichung (2) ist somit der Modellansatz zur Auffindung der wahren mathematischen Darstellung einer Menge von Kausalzusammenhängen. Es ist folgendes zu beachten:

1. Existiert eine wahre mathematische Darstellung für eine gegebene Menge von Kausalzusammenhängen, so hat sie die Form von Gl. (2).
2. Bildet man aus einer gegebenen Menge von Meßwerten der Meßgrößen $E_1, \dots, E_K$, Z ein mathematisches Modell mit dem Ansatz Gl. (2) und ist dieses Modell zeitlich *nicht* forminvariant (*nicht* wahr), so läßt sich mit diesen Meßgrößen *gar kein* wahres Modell finden. (In diesem Fall existieren keine stationären Zustände $(E_1, \dots, E_K, Z)_{t \lesssim 0}$.)

5. Beispiel

Die in den Arbeiten zur Regressionsanalyse angegebenen Methoden beziehen sich in der Regel nur auf die Bestimmung des mathematischen Modells aus den Meßwerten des *ersten* Experimentes. Die mathematischen Methoden dienen dazu, diese Meßwerte so exakt wie möglich zu beschreiben. Eine hohe Signifikanz der Koeffizienten ist aber noch keine Garantie für die Wahrheit des Modells. Die ermittelte Regressionsgleichung, die eine Menge von Meßdaten sehr genau beschreibt, kann durchaus falsch sein. Sie ist es dann, wenn eine Wiederholung des Experimentes eine andere Gleichung liefert. Zur Erläuterung möge folgendes Beispiel betrachtet werden:

Angenommen, im ersten Experiment wurden die Meßdaten für die beiden Meßgrößen E (Einflußgröße) und Z (Zielgröße) erhalten, die im Bild 2a dargestellt sind. Eine Wiederholung des Experimentes möge die im Bild 2b gezeigten Werte ergeben haben. Rein optisch läßt sich sofort erkennen, daß die zu Bild 2a gehörige Regressionsgleichung $Z = f(E)$ falsch sein muß, da Bild 2b eine völlig andere mathematische Darstellung haben wird. Heißt das aber nun, daß in dem betrachteten Fall kein Zusammenhang existiert? Diese Schlußfolgerung wäre nicht richtig. Es kann durchaus sein, daß die Struktur des Modellansatzes $Z = f(E)$ falsch ist. Um aber die richtige Struktur zu erfassen, reicht es nicht aus, nur die Meßwerte der jeweiligen Meßgrößen zu betrachten. Die Struktur des Modellansatzes wird durch die Experimentiermethode bestimmt. Diese legt fest, was die abhängigen und was die unabhängigen Variablen sind.

Für die in den Bildern 2a und 2b dargestellten Meßwerte möge folgende Experimentiermethodik verwendet worden sein. Gemessen wurden die bis zum Bezugszeitpunkt konstanten Werte $E(t \lesssim 0)$, $Z(t \lesssim 0)$. Danach wurde E geändert. Die Änderungen von E geschahen sprungförmig, d. h. vom Wert $E(t \lesssim 0)$ auf $E(t \lesssim 0) + \Delta E$ (s. Bild 3). Es ergaben sich die neuen stationären Zustände $(E(t \lesssim 0) + \Delta E, Z(t \lesssim 0) + \Delta Z)$. (Die Übergänge in stationäre Zustände mögen nach t^* erfolgt sein.) Die im Bild 2 angegebenen Variablen E und Z sind die in den stationären Zuständen gemessenen Werte.

An der Art und Weise der Durchführung des Experiments sind die tatsächlichen Variablen erkennbar (s. Gl. (2)): unabhängige Variable sind $E(t \lesssim 0)$, $Z(t \lesssim 0)$ und ΔE, die abhängige Variable ist ΔZ.

In der Tafel sind die gesamten Meßwerte angegeben. Die Werte der Versuche 1—6 (erstes Experiment) sind im Bild 2a, die der Versuche 7—12 im Bild 2b dargestellt, und zwar die Werte der Spalten E und Z. Zu diesem Ergebnis würde man gelangen,

Tafel. Meßdaten des Beispiels

Versuch Nr.	$E(t \lesssim 0)$	ΔE	$Z(t \lesssim 0)$	ΔZ	E	Z
1	1	1	1	2	2	3
2	1	−1	1	0	0	1
3	1	2	2	5	3	7
4	2	1	2	4	3	6
5	2	−1	2	0	1	2
6	2	2	1	4	4	5
7	2	1	4	6	3	10
8	2	−2	4	−6	0	−2
9	2	−1	5	−3	1	2
10	3	1	5	8	4	13
11	3	−2	4	−5	1	−1
12	3	−1	4	−1	2	3

wenn man die Methodik, die in der Literatur zur Regressionsanalyse angegeben wird, verwenden würde; sie nimmt nämlich an, daß von jeder Meßgröße genau ein Meßwert in das Regressionsmodell eingeht. Das führt aber nur dann zu einer wahren mathematischen Darstellung, wenn in stationären Zuständen $(E, Z)_{t \lesssim 0}$ der Wert $Z(t \lesssim 0)$ eindeutig dem Wert $E(t \lesssim 0)$ zugeordnet ist, d. h. $E(t \lesssim 0) \to Z(t \lesssim 0)$. Nur dann würde der Ansatz $Z(t \lesssim 0) = f[E(t \lesssim 0)]$ ein wahres mathematisches Modell liefern (s. [4]). Im vorliegenden Fall existiert jedoch die genannte Zuordnung nicht. Deshalb muß man bei der Ermittlung des mathematischen Modells den Ansatz

$$\Delta Z = f[\Delta E, E(t \lesssim 0), Z(t \lesssim 0)]$$

zugrunde legen, der sich aus Gl. (2) ergibt mit $F\left[\Delta E(\tau)\Big|_{0}^{t>t^*}\right] = \Delta E$ für den speziellen, im Bild 3 gezeigten sprungförmigen Verlauf von E. Mit den Meßwerten der Tafel ergibt sich daraus

$\Delta Z = \Delta E \cdot Z(t \lesssim 0) + E(t \lesssim 0)$ als mathematische Darstellung der vorliegenden Zusammenhänge.

Dieses Beispiel demonstriert, daß die Gleichsetzung von Meßgröße und Variabler im mathematischen Modell (vgl. z. B. [1] und [2]) i. allg. zu falschen Ergebnissen führt. Was Variable sind, wird durch die Experimentiermethode festgelegt.

Zusammenfassung

Die Untersuchungen des Beitrags zeigen, daß die allgemeine Modellstruktur einer Menge von Kausalzusammenhängen, die mit Hilfe der Meßgrößen $E_1, \dots, E_K, Z$ abbildbar sind, Gl. (2) ist. Existieren Kausalzusammenhänge, die allein durch die genannten Meßgrößen abbildbar sind, so haben sie diese Modellstruktur. Soll, ausgehend von Meßwerten solcher Meßgrößen, eine mathematische Darstellung gefunden werden, so muß von Gl. (2) als allgemeinem Modellansatz ausgegangen werden; ergibt sich für diese Modellstruktur keine wahre mathematische Darstellung, d. h., ist das mathematische Modell bei Wiederholung des Experimentes ein anderes, so existiert gar keine mathematische Darstellung, die ausschließlich Meßwerte von $E_1, \dots, E_K, Z$ enthält. Es gibt also Fälle, in denen es prinzipiell unmöglich ist, ein mathematisches Modell zu bilden.

Literatur

[1] *Nollau, V.*: Statistische Analysen. Leipzig: VEB Fachbuchverlag 1975.

[2] *Pegel, B.*: Empirische Modellbildung und Versuchsplanung. Berlin: Akademie-Verlag 1980.

[3] *Härtler, G.*: Versuchsplanung und statistische Datenanalyse. Berlin: Akademie-Verlag 1976.

[4] *Klett, E.*: Grundzüge der Modellierung technologischer Zusammenhänge und deren mathematische Darstellung. Manuskript zur Dissertation B.

msr 7428

Doz. Dr. *O. G. Rudenko*, Charkow[1])

Untersuchung adaptiver Algorithmen zur Identifikation von Steuerungsobjekten

IA 2.5.; 2.6.

0. Einleitung

Bei der Synthese von automatischen Steuerungen von komplizierten Objekten ist eine periodische Präzisierung (Identifikation) ihrer Parameter anhand der Beobachtungen der Eingangs- und Ausgangsvariablen erforderlich. Eine große Bedeutung erlangten die iterativen Adaptionsalgorithmen zur Identifikation, die das Objekt mit minimaler A-priori-Information zu identifizieren gestatten [1]. Bei der praktischen Realisierung von Algorithmen dieser Art ist das wichtigste Merkmal ihrer Arbeitsfähigkeit die Konvergenzgeschwindigkeit, die sich auf die Dauer der Prozeßparameterbestimmung auswirkt. Eine Vielzahl von Untersuchungen des Katschmash-Algorithmus und verschiedener seiner Modifikationen, im Detail in den Beiträgen [2] bis [4] aufgeführt, hat gezeigt, daß die Iterationsalgorithmen dieser Klasse bei Abwesenheit von Störungen sich sehr schnell anpassen. Aber bei vorhandenen Störungen ermöglichen es die Algorithmen nicht immer, die erforderliche Genauigkeit der Lösung zu erhalten. Die Anwendung von Algorithmen der stochastischen Approximation, z. B. des Algorithmus von *Robbins-Monro* [1] [2] und [5], erlaubt die Objektidentifikation bei Störungen, aber hinsichtlich der Geschwindigkeit sind sie dem Katschmash-Algorithmus unterlegen. Es muß noch dazu ergänzt werden, daß, obwohl die asymptotische Konvergenz der Algorithmen der stochastischen Approximation garantiert ist, wenn die Wahl ihrer Parameter bestimmten Bedingungen genügt, die Konvergenzgeschwindigkeit im wesentlichen von den Werten dieser Parameter abhängt (die Wahl großer Parameterwerte führt zur Divergenz des Iterationsprozesses der Parameterbestimmung in den ersten Schritten der Prozeßidentifikation und die Wahl von kleinen Werten zur Verlangsamung der Geschwindigkeit des Algorithmus).

Werden Algorithmen komplizierterer Struktur angewendet, insbesondere Mehrschrittalgorithmen, so kann man in einigen Fällen eine wesentliche Verkürzung der Identifikationszeit für die Steuerungsobjekte erreichen. Eine solche Vorgehensweise ist in

[1]) Dieser Beitrag entstand während einer Delegierung an die TH Ilmenau, Sektion Technische und Biomedizinische Kybernetik, WB Automatische Steuerung. Mitteilung aus der Hochschule für Radioelektronik Charkow, Sektion Technische Kybernetik.

[1] erwähnt. In [6] ist eine mehrschrittige modifizierte Prozedur nach *Katschmash* aufgeführt, und in [7] wird eine Vergleichsanalyse von ein- und mehrschrittigen Algorithmen bei Vorhandensein von Störungen vorgenommen.

1. Aufgabenstellung

Viele lineare stationäre Systeme können beschrieben werden durch eine diskrete Gleichung der Form

$$y_n = c^{*T} x_n + \xi_n \,. \tag{1}$$

y_n beobachtetes Ausgangssignal, $x_n = (x_{1n}, x_{2n}, \dots, x_{Nn})^T$ Vektor der Eingangsgrößen, $c^* = (c_1^*, c_2^*, \dots, c_N^*)^T$ gesuchter Vektor der Objektparameter, ξ_n Ausgangsstörung, T Transpositionssymbol, $n = 0, 1, 2, \dots$ diskrete Zeit

Die Identifikationsaufgabe, die in der Bestimmung des unbekannten Parametervektors c^* aufgrund von Meßergebnissen x_n und y_n besteht, führt zur Minimierung eines gewissen vorgegebenen Gütefunktionals, das gewöhnlich eine konvexe Funktion der Differenz von Modell- und Objektausgang $Q(y_n, y_n^M)$ ist.

Die Verwendung des Algorithmus der stochastischen Approximation

$$c_n = c_{n-1} + \Gamma_n(y_n - c_{n-1}^T x_n)\, x_n \tag{2}$$

zum Zwecke der Identifikation führt bei entsprechender Wahl der Matrix Γ_n zur Konvergenz der Folge $\{c_n\}$, gebildet nach Gl. (2), zu c^*. Häufig wird diese Matrix in der Form $\Gamma_n = \gamma_n \cdot I$ gewählt, wobei I die Einheitsmatrix, γ_n ein Skalar sind. Die Konvergenz der Prozedur (2) mit Wahrscheinlichkeit 1 und im quadratischen Mittel zeigt sich für einen großen Variationsbereich des Koeffizienten γ_n. Ist allein Konvergenz oder Divergenz der Reihen gefordert, so hängen ihre Glieder von γ_n ab, d. h.

$$\sum_{n=1}^{\infty} \gamma_n \to \infty \,, \qquad \sum_{n=1}^{\infty} \gamma_n^2 < \infty \,.$$

Das ist die sogenannte Dvorezko-Bedingung [1] [3] und [5]. Es muß bemerkt werden, daß die Wahl von γ_n die Eigenschaften des Algorithmus sehr stark beeinflußt, die Arbeitsfähigkeit der Prozedur und die Geschwindigkeit ihrer Konvergenz bestimmt dieser einzige freie Parameter.

Bei der praktischen Realisierung von Iterationsalgorithmen zur Identifikation ist das wichtigste Kennzeichen ihrer Arbeitsfähigkeit die Konvergenzgeschwindigkeit, die die Dauer des Prozesses der Bestimmung der Objektparameter beeinflußt. Deshalb muß der Parameter γ_n nicht nur nach der Bedingung der Konvergenz gewählt werden, sondern nach der schnellsten Konvergenz.

Den Prozeß der Parameteranpassung kann man bedeutend verkürzen, wenn man Algorithmen komplizierterer Struktur verwendet, insbesondere mehrschrittige adaptive Algorithmen. Diese Algorithmen verwenden für die nächste Iteration nicht nur die Information über den letzten Schritt, sondern über mehrere vorhergehende Schritte. Dabei kann man wegen der besseren Extrapolation und Filterung eine wesentliche Verkürzung der Identifikationszeit erwarten.

Andererseits soll die Berücksichtigung dieser Information, d. h. die Vergrößerung des Umfangs des Algorithmus, Schwingungen bei der Ermittlung der Modellkoeffizienten glätten. Ein S-schrittiger Algorithmus der Identifikation kann in folgender Form dargestellt werden

$$c_n = c_{n-1} + \sum_{i=1}^{S} \gamma_{in}(y_{n-i+1} - c_{n-1}^T\, x_{n-i+1})\, x_{n-i+1} \,. \tag{3}$$

Die Konstruktion des Algorithmus besteht im Finden der Koeffizienten $\gamma_{1n}, \gamma_{2n}, \dots, \gamma_{sn}$, die die größte Konvergenzgeschwindigkeit des Algorithmus garantieren.

Eines der einfachsten und bequemsten Kriterien, das die Konvergenzgeschwindigkeit der Algorithmen charakterisiert, kann sein

$$\psi_n = ||\vartheta_{n-1}||^2 - ||\vartheta_n||^2 \,, \tag{4}$$

wobei $\vartheta_i = c_i - c^*$,

$$||\vartheta_i|| = \left(\sum_{i=1}^{N} \vartheta_{ij}^2\right)^{1/2} \quad \text{Euklidische Norm} \,.$$

Für die Konvergenz des Algorithmus ist notwendig, daß

$$\psi_n > 0 \,. \tag{5}$$

$\psi_n = 0$ besagt, daß der Punkt c_n auf der Oberfläche der Hyperkugel mit dem Radius $||c_{n-1} - c^*||$ liegt. Im Falle der Ungleichheit (5) liegt jeder folgende Punkt c_n innerhalb der Hyperkugel mit dem Radius $||c_{n-1} - c^*||$, d. h., die monotone Konvergenz des Algorithmus ist garantiert [8].

Im allgemeinen Fall kann man wegen der Zufälligkeit der Größen, die in den Algorithmus eingehen (Nutzsignale und Störungen, aber oft auch c^*), eine Gütebeurteilung der Konvergenzgeschwindigkeit der Prozeduren zweckmäßig charakterisieren durch

$$\psi_n = E\{||\vartheta_{n-1}||^2 - ||\vartheta_n||^2\} \,. \tag{6}$$

2. Konstruktion von Mehrschrittalgorithmen

Zunächst wird die Konstruktion eines Einschrittalgorithmus, der ψ_{max} sichert, betrachtet. Wird der Einschrittalgorithmus für den Identifikationsfehler ϑ_i geschrieben, werden beide Seiten des erhaltenen Ausdrucks quadriert, und werden ϑ_n und ϑ_{n-1} in Gl. (4) substituiert, dann erhält man

$$\psi_n = 2\gamma_{1n}(\vartheta_{n-1}^T x_n)^2 - \gamma_{1n}^2(\vartheta_{n-1}^T x_n)^2\, ||x_n||^2 \,. \tag{7}$$

Das Nullsetzen von $\partial\psi_n/\partial\gamma_{1n}$ führt auf eine Gleichung für γ_{1n}. Die Lösung ergibt:

$$\gamma_{1n}^{opt} = \frac{1}{||x_n||^2} \,. \tag{8}$$

Folglich ist der optimale Einschrittalgorithmus mit dem Algorithmus von *Katschmash* identisch [1] [3] und [6].

Bei der Konstruktion des optimalen Zweischrittalgorithmus ($S = 2$) erhält man ein System von zwei Gleichungen mit den zwei Unbekannten γ_{1n} und γ_{2n}. Seine Lösung ergibt γ_{1n}^{opt} und γ_{2n}^{opt}. Auf diese Weise führt die Aufgabe der Konstruktion eines S-schrittigen Algorithmus zu einem System von S linearen algebraischen Gleichungen für die Unbekannten $\gamma_{1n}, \gamma_{2n}, \dots, \gamma_{Sn}$. Die Lösung dieses Systems führt zu folgendem Algorithmus [6]:

$$c_n = c_{n-1} + p_n X_S [X_S^T\, X_S]^{-1} E_S \,, \tag{9}$$

wobei $X_S = (x_n, x_{n-1}, \dots, x_{n-s+1})$ eine $(N \times S)$-dimensionale Matrix,

$$E_S = (y_n - c_{n-1}^T x_n, y_{n-1} - c_{n-1}^T x_{n-1}, \dots, \\ y_{n-S+1} - c_{n-1}^T x_{n-S+1})^T \,,$$

der $(S \times 1)$-dimensionale Fehlervektor, $p_n \in (0, 2)$ sind.

3. Untersuchung der Eigenschaften der Algorithmen

Betrachtet werden die Eigenschaften des Algorithmus (9), wobei die gewöhnlichen Voraussetzungen für die statistischen Eigenschaften der Signale und Störungen gemacht werden, d. h.

$$E\{x_i\} = 0 \,, \qquad E\{x_i x_j\} = \sigma_x^2 \delta_{ij} \,, \qquad E\{\xi_i\} = 0 \,, \\ E\{\xi_i^2\} = \sigma_\xi^2 \,,$$

und die Störungen sind mit den Nutzsignalen nicht korreliert. Das Grundproblem bei der Anwendung der Prozedur (9) ist die Wahl der Schrittzahl S des Algorithmus.

3.1. *Störungsfreier Fall*

Der Algorithmus (9) lautet für den Identifikationsfehler

$$\boldsymbol{\vartheta}_n = \boldsymbol{\vartheta}_{n-1} - p_n X_S [X_S^T X_S]^{-1} X_S^T \boldsymbol{\vartheta}_{n-1} . \quad (10)$$

Bei Anwendung der Erwartungsoperation auf Gl. (10) folgt

$$E\{\boldsymbol{\vartheta}_n\} = E\{[\boldsymbol{I} - p_n X_S [X_S^T X_S]^{-1} X_S^T] \boldsymbol{\vartheta}_{n-1}\} , \quad (11)$$

worin $\boldsymbol{I}$ die Einheitsmatrix ist.
Man zeigt leicht, daß bei den gemachten Voraussetzungen für die statistischen Eigenschaften der Signale gilt

$$E\{X_S [X_S^T X_S]^{-1} X_S^T\} = \frac{S}{N} \boldsymbol{I} . \quad (12)$$

Aus Gl. (12) erhält man, daß der Algorithmus (9) bei Erfüllung der Bedingung

$$\left|1 - p_n \frac{S}{N}\right| < 1 \quad \text{oder} \quad 0 < p_n < \frac{2N}{S} \quad (13)$$

im Mittel konvergiert. Quadriert man Gl. (10)

$$||\boldsymbol{\vartheta}_n||^2 = \\ = ||\boldsymbol{\vartheta}_{n-1}||^2 - p_n(2 - p_n)\, \boldsymbol{\vartheta}_{n-1}^T X_S [X_S^T X_S]^{-1} X_S^T \boldsymbol{\vartheta}_{n-1} \quad (14)$$

und bildet die mathematische Erwartung

$$E\{||\boldsymbol{\vartheta}_n||^2\} = \\ = E\{\boldsymbol{\vartheta}_{n-1}^T [\boldsymbol{I} - p_n(2 - p_n) X_S [X_S^T X_S]^{-1} X_S^T]\, \boldsymbol{\vartheta}_{n-1}\} ,$$

dann ist

$$E\{||\boldsymbol{\vartheta}_n||^2\} = \left(1 - p_n(2 - p_n) \frac{S}{N}\right) E\{||\boldsymbol{\vartheta}_{n-1}||^2\} . \quad (15)$$

Aus Gl. (15) folgt, daß für die Konvergenz des Algorithmus im quadratischen Mittel notwendig ist, daß die Bedingung erfüllt wird

$$0 < 1 - p_n (2 - p_n) \frac{S}{N} < 1$$

für $p_n \in (0, 2)$, $(S \leqq N)$.

Aus Gl. (15) können die optimalen Werte p_n^{opt} und S^{opt} erhalten werden, die die maximale Konvergenzgeschwindigkeit des Algorithmus ermöglichen. Wählt man $p_n = 1$ und $S = N$, so erhält man tatsächlich, daß der Fehler der Schätzung $\boldsymbol{c}^*$ nach $N = S$ Schritten gleich Null ist. Daher ist im störungsfreien Fall der Algorithmus nach der Methode der kleinsten Quadrate optimal (hinsichtlich ψ_{max}).

Daraus ergibt sich die Schlußfolgerung: Beim Fehlen von Störungen ist im Mehrschrittalgorithmus die Schrittzahl S gleich der Dimension des Problems N zu setzen.

3.2. *Störungsfall ($\xi \neq 0$)*

Wenn die Störung auf $\boldsymbol{y}_n$ einwirkt, dann hat der Algorithmus die Form

$$\boldsymbol{c}_n = \boldsymbol{c}_{n-1} + p_n X_S [X_S^T X_S]^{-1} \boldsymbol{E}_S + p_n X_S [X_S^T X_S]^{-1} \xi_S , \quad (16)$$

wobei

$$\xi_S = (\xi_n, \xi_{n-1}, \dots, \xi_{n-S+1}) ,$$

der $(S \times 1)$-dimensionale Störungsvektor ist. Weil vorausgesetzt ist, daß die Störungen eine mathematische Erwartung gleich Null haben, so folgt leicht, daß für die Konvergenz des Algorithmus im Mittel die Erfüllung der Bedingung (13) notwendig ist.

Quadriert man den Algorithmus (16), bildet die Erwartung und berücksichtigt, daß Störungen und Nutzsignale unabhängig sind, so folgt

$$E\{||\boldsymbol{\vartheta}_n||^2\} = \\ = E\{\boldsymbol{\vartheta}_{n-1}^T [\boldsymbol{I} - p_n(2 - p_n) X_S [X_S^T X_S]^{-1} X_S^T]\, \boldsymbol{\vartheta}_{n-1} + \\ + \{p_n^2 \xi_S^T [X_S^T X_S]^{-1} \xi_S\} . \quad (17)$$

Mit Gl. (12) erhält Gl. (17) die Form

$$E\{||\boldsymbol{\vartheta}_n||^2\} = \left(1 - p_n(2 - p_n) \frac{S}{N}\right) E\{||\boldsymbol{\vartheta}_{n-1}||^2\} + \\ + E\{p_n^2 \xi_S^T [X_S^T X_S]^{-1} \xi_S\} . \quad (18)$$

Daraus folgt, daß $E\{||\boldsymbol{\vartheta}_n||^2\}$ jetzt nicht nur von der Schrittzahl S und der Dimension des Problems N abhängt, sondern auch von den statistischen Eigenschaften der Störung. Der optimale Wert p_n^{opt} wird unterschiedlich von Eins und hängt nur von den statistischen Eigenschaften der Störung ab. Man gewinnt leicht

$$p_n^{opt} = \frac{E\{\boldsymbol{\vartheta}_{n-1}^T X_S [X_S^T X_S]^{-1} X_S^T \boldsymbol{\vartheta}_{n-1}\}}{E\{\boldsymbol{\vartheta}_{n-1}^T X_S [X_S^T X_S]^{-1} X_S^T \boldsymbol{\vartheta}_{n-1}\} + E\{\xi_S^T [X_S^T X_S]^{-1} \xi_S\}} . \quad (19)$$

Die Beziehung (19) für p_n^{opt} ist praktisch nicht zu verwenden. Aber daraus kann man folgern, daß man bei Störungen $p_n < 1$ benutzen muß, und zwar um so kleiner, je größer die Störung ist.

Wenn die Eingangsvektoren orthogonal sind, dann kann man die Beziehung (18) in folgender Weise vereinfachen

$$E\{||\boldsymbol{\vartheta}_n||^2\} = \\ = \left(1 - p_n(2 - p_n) \frac{S}{N}\right) E\{||\boldsymbol{\vartheta}_{n-1}||^2\} + p_n^2\, S \frac{\sigma_\xi^2}{\sigma_x^2} . \quad (20)$$

Der Einfluß der Störungen führt zur Entstehung eines gewissen Restfehlers der Identifikation, der sich aus Gl. (20) berechnet

$$\lim_{n \to \infty} E\{||\boldsymbol{\vartheta}_n||^2\} = \frac{p_n}{2 - p_n} N \frac{\sigma_\xi^2}{\sigma_x^2} . \quad (21)$$

Hieraus folgt, daß sich bei beliebig großer Beobachtungszeit ein Restfehler der Schätzung $\boldsymbol{c}^*$ ergibt, der nach Gl. (21) ermittelt wird und vom Verhältnis der Dispersion des Rauschens und des Nutzsignals, von der Dimension des Problems N und vom Parameter p_n abhängt und von der Größe des Gedächtnisses des Algorithmus (Schrittzahl) S unabhängig ist. Nach Gl. (21) ist für eine Verringerung des Restfehlers notwendig, daß der Wert p_n verkleinert wird. Aber die Wahl eines beliebigen festen p_n erlaubt nicht, diesen Fehler zu begrenzen. Die einzige Möglichkeit $\lim_{n \to \infty} E\{||\boldsymbol{\vartheta}_n||^2\} = 0$ zu erhalten, besteht in der Wahl des Parameters p_n so, daß die Bedingung befriedigt wird $\lim_{n \to \infty} p_n = 0$ (Dvorezko-Bedingung).

4. Verallgemeinerung

Die allgemeinste Form der Mehrschrittalgorithmen ist die folgende

$$\boldsymbol{c}_n = \sum_{i=1}^{M} \alpha_i \boldsymbol{c}_{n-1} + \sum_{j=1}^{S} \gamma_{jn} (y_{n-j+i} - \boldsymbol{c}_{n-j}^T \boldsymbol{x}_{n-j+1})\, \boldsymbol{x}_{n-j+1} , \quad (22)$$

wobei $\sum_{i=1}^{M} \alpha_i = 1$.

Die Parameter des Algorithmus α_i $(i = \overline{1, M})$, γ_{jn} $(j = \overline{1, S})$ müssen nach den Bedingungen seiner schnellsten Konvergenz gewählt werden. Die Auswertung des Kriteriums (4) erlaubt, α_i^{opt} und γ_{jn}^{opt} zu ermitteln. Die dabei erhaltenen Werte der gesuchten Parameter werden jedoch von $\boldsymbol{\vartheta}_i$ $(i = \overline{1, m})$ oder von $\boldsymbol{c}_i^*$ abhängig sein, d. h., diese Vorgehensweise führt nicht zu praktisch realisierbaren Ergebnissen.

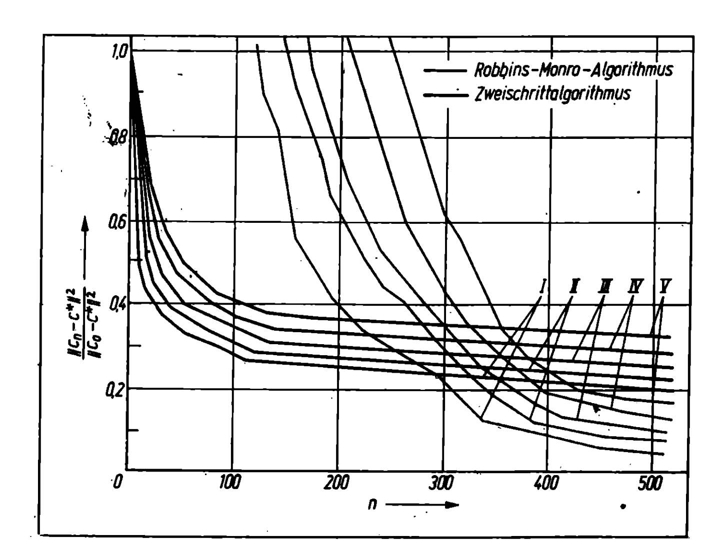


Bild 1. Konvergenzvergleich

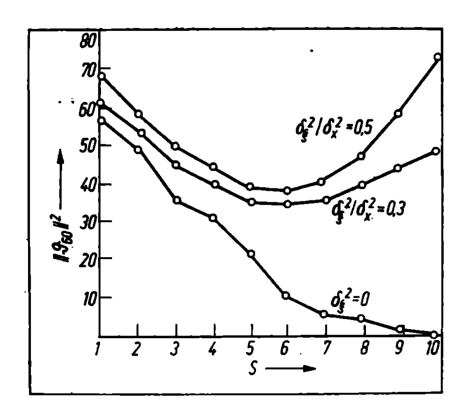
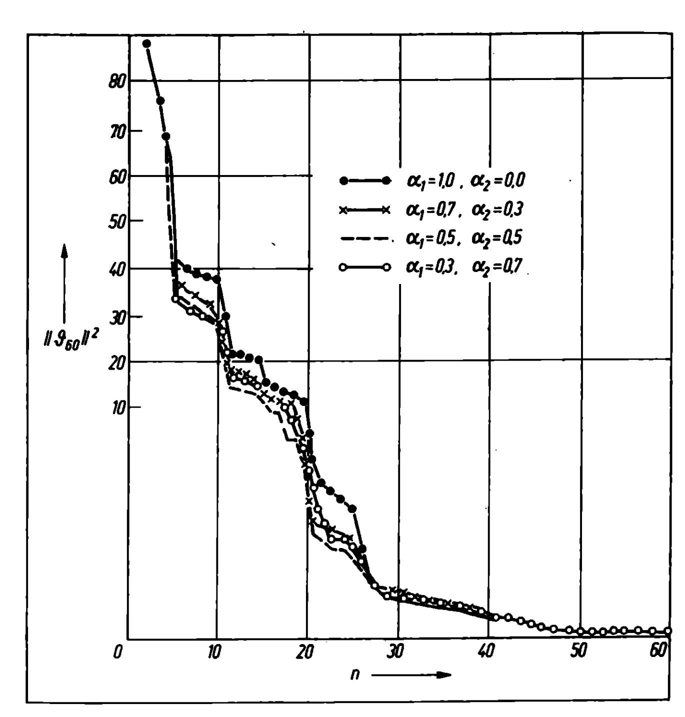


Bild 2. Schrittzahlabhängigkeit

Bild 3. Parameterabhängigkeit



Am zweckmäßigsten erscheint folgendes Vorgehen:

Wahl gewisser fester α_i ($i = \overline{1, M}$) und Ermittlung der Parameter γ_{nj} ($j = 1, S$), die das Maximum von Gl. (4) gewährleisten, d. h. Ersatz des Kriteriums $\psi_n' = ||\vartheta_{n-1}||^2 - ||\vartheta_n||^2 \to \max\limits_{\alpha_i, \gamma_j}$ durch das Kriterium $\psi_n'' = ||\vartheta_{n-1}||^2 - ||\vartheta_n||^2 \to \max\limits_{\gamma_j}$.

Demzufolge kann man den Algorithmus in folgender Form erhalten

$$\mathbf{c}_n = \hat{\mathbf{c}}_{n-1} + p_n X_S [X_S^T X_S]^{-1} \hat{\mathbf{E}}_S \,, \tag{23}$$

wobei

$$\hat{\mathbf{c}}_{n-1} = \sum_{i=1}^{M} \alpha_i \mathbf{c}_{n-i} \,,$$

$$\hat{\mathbf{E}}_S = (y_n - \hat{\mathbf{c}}_{n-1}^T \mathbf{x}_n, y_{n-1} - \hat{\mathbf{c}}_{n-1}^T \mathbf{x}_{n-1}, \dots, \dots, y_{n-S+1} - \hat{\mathbf{c}}_{n-1}^T \mathbf{x}_{n-S+1})^T \,,$$

$$\sum_{i=1}^{M} \alpha_i = 1 \,, \qquad p_n \in (0, 2) \,.$$

5. Statistische Simulation

Ergebnisse der statistischen Simulation der Arbeitsweise der Algorithmen sind in den Bildern 1 bis 3 gezeigt.

Bild 1 veranschaulicht die Ergebnisse einer Vergleichsanalyse des Robbins-Monro-Algorithmus und der Zweischrittprozedur (9) mit $S = 2$. Für beide Prozeduren wurde $p_n = 1/n$ gewählt. Im Bild entsprechen die dicken Linien der Zweischrittprozedur und die dünnen der Robbins-Monro-Prozedur. Die Kurven *I* bis *V* entsprechen den Dispersionsverhältnissen $\sigma_\xi^2/\sigma_x^2 = 0{,}1$; $0{,}2$; $0{,}3$; $0{,}4$; $0{,}5$.

Wie man sieht, konvergiert die Zweischrittprozedur in den Anfangsschritten des Identifikationsprozesses schneller. Das Vorhandensein von Störungen führt dazu, daß die Einschrittprozedur anfangs divergieren kann, aber dann übersteigt ihre Konvergenzgeschwindigkeit die der Zweischrittprozedur. Die untersuchten Algorithmen mit unterschiedlicher Größe des Gedächtnisses S verhalten sich nach einem endlichen Zeitintervall (60 Schritte) gemäß Bild 2. Dabei wurde der Prozeß der Identifikation eines linearen Objektes mit 10 Eingängen und einem Ausgang mit und ohne Störung ξ_n betrachtet. Wie ersichtlich, führt bei Fehlen von Störungen eine Vergrößerung des Gedächtnisses des Algorithmus zu einer Verkürzung der Prozeßidentifikation, und bei $S = N$ ist die Identifikation beendet. Bei Störungen und $S^{\text{opt}} \neq N$ ist eine wesentliche Vergrößerung des Gedächtnisses des Algorithmus unzweckmäßig.

Im Bild 3 sind die Ergebnisse der Untersuchung des Algorithmus (23) gezeigt, wobei $M = 2$ und $S = 2$, $\sigma_\xi^2 = 0$.

Nach den Simulationsergebnissen ist für die Systemidentifikation eine Kombination von Mehrschrittalgorithmen für die ersten Schritte und einem Einschrittalgorithmus für die endgültige Bestimmung der Parameter zweckmäßig.

Literatur

[1] *Zypkin, Ja. S.:* Adaption und Lernen in automatischen Systemen (in Russ.). Moskva: Nauka 1968.

[2] *Poljak, B. T.; Zypkin, Ja. S.:* Pseudogradientenalgorithmen für Adaption und Lernen (in Russ.). Avtomatika i telemechanika (1973) No. 3, str. 45–68.

[3] *Raibman, N. S.; Čadeev, V. M.:* Modellbildung industrieller Prozesse (in Russ.). Moskva: Energija 1975.

[4] *Avedjan, A. D.:* Bestimmung der Parameter linearer Modelle stationärer und instationärer Strecken. msr **16** (1971) H. 9, S. 348–350.

[5] *Vasan, M.:* Stochastičeskaja aproksimacija. Moskva: Mir 1972.

[6] *Avedjan, A. D.:* Modifizierung von Katschmash-Algorithmen für die Parameterbestimmung linearer Objekte (in Russ.). Avtomatika (1978) No. 5, str. 64–72.

[7] *Poljak, B. T.:* Vergleich der Konvergenzgeschwindigkeit von Ein- und Mehrschrittalgorithmen der Optimierung bei Störungen (in Russ.). Isd. AN SSSR; Techničeskaja kybernetika (1977) No. 1, str. 9–12.

[8] *Rudenko, O. G.:* Algorithmus von *Robbins-Monro* und seine Zweischrittmodifikation zur Identifizierung linearer Objekte. msr **20** (1977) H. 4, S. 192–194.

msr 7431

Dipl.-Ing. *L. Janke*, Karl-Marx-Stadt[1])

Vergleichsmodelladaption bei Stellsignalbegrenzung und Strukturunterschieden zwischen Modell und Objekt

IA 2.5.

0. Einleitung

Beim Entwurf eines vergleichsmodelladaptiven Systems wird davon ausgegangen, daß Vergleichsmodell und Objekt durch den adaptiven Eingriff in ihrem Übertragungsverhalten in Übereinstimmung zu bringen sind, um das geforderte optimale Verhalten zu sichern. Diese Übereinstimmung kann bei gleicher Struktur von Vergleichsmodell und Objekt sowie durch einen entsprechenden adaptiven Eingriff erreicht werden. In [1] werden sog. „perfect modell following conditions" angegeben, die dafür zu erfüllen sind. Wird der Adaptionsalgorithmus für eine vereinfachte Struktur entworfen, kann die Adaption für die reale Struktur Schwierigkeiten bereiten.
Ein solcher Fall des Entwurfs eines adaptiven Systems für eine vereinfachte Struktur ist in [2] an einem Lageregelkreis mit Stellsignalbegrenzung dargestellt. Hat die Regelstrecke in der Realität nicht die in [2] angenommene einfache Struktur, sondern bildet ein kompliziertes elektromechanisches Übertragungssystem, wie es in [3] entwickelt wurde, so kann die Übereinstimmung des Verhaltens des einfachen Vergleichsmodells und des komplizierten Objekts nicht mehr mit dem in [2] entworfenen Adaptionsalgorithmus erreicht werden. Es besteht die Gefahr, daß die Adaption die Eigenschaften des Objekts gegenüber dem Fall ohne Adaption verschlechtert. Es sollen deshalb hier einige Möglichkeiten zur Ergänzung des Systems dargestellt werden, die es gestatten, weiterhin den Adaptionsalgorithmus einzusetzen, ohne daß die völlige Übereinstimmung der Strukturen von Vergleichsmodell und Objekt vorhanden ist.

1. Problemstellung

Der vereinfachte Lageregelkreis mit dem adaptiven Eingriff über zwei veränderliche Proportionalglieder, wie er in [2] angegeben ist, wird durch einen weiteren, unterlagerten Regelkreis für die Stellgröße und durch ein PT_1-Glied erweitert. Das PT_1-Glied, über das die Winkelgeschwindigkeit verzögert wird, stellt eine grobe Annäherung an das komplizierte mechanische Übertragungssystem dar, wie es in [3] angegeben ist. Die coulombsche Reibung wird ebenfalls mit berücksichtigt. Das Reibmoment M_R hat in Vergleichsmodell und Objekt den gleichen Wert. Wie in [4] gezeigt wird, kann aufgrund der Eigenschaften des adaptiven Systems auch eine langsam veränderliche coulombsche Reibung identifiziert werden und im Vergleichsmodell Berücksichtigung finden.
Die Struktur des erweiterten Lageregelkreises mit adaptivem Eingriff zeigt Bild 1. Die nicht durch das PT_1-Glied verzögerte Lage φ kann über ein integrales Meßsystem erfaßt werden. Zur weiteren Annäherung an das mechanische Übertragungssystem nach [3] mit Spiel im Übertragungsweg kann der Teil der Strecke mit dem Eingang y und dem Ausgang ω_1 durch die im Bild 2 gezeigte Struktur ersetzt werden. Diese Struktur ist gegenüber [3] etwas vereinfacht, gibt aber wesentliche Eigenschaften wieder. Der Lageregelkreis soll zeitoptimales Verhalten haben, das durch das Vergleichsmodell vorgegeben wird.

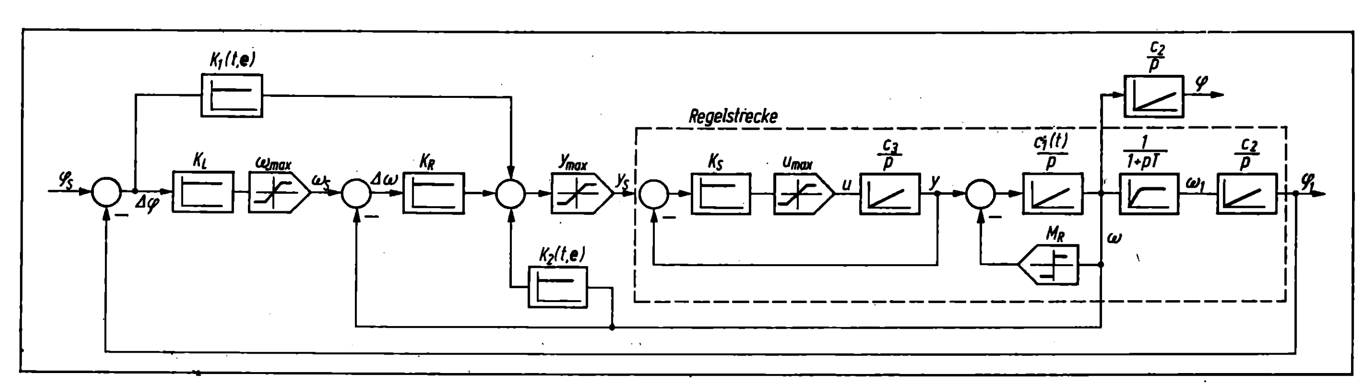


Bild 1. Lageregelkreis

Parameter: $c_1(t) = 363{,}5 \cdot 1/\mathrm{Vs}^2$, $c_2 = 1$, $c_3 = 318 \cdot 1/\mathrm{s}$, $M_R = 1{,}09$ V, $K_L = 62{,}5 \cdot 1/\mathrm{s}$, $K_R = 2{,}8$ Vs, $K_S = 324$, $T = 2$ ms, $y_{max} = 10$ V, $\omega_{max} = 157{,}08 \cdot 1/\mathrm{s}$, $u_{max} = 10$ V

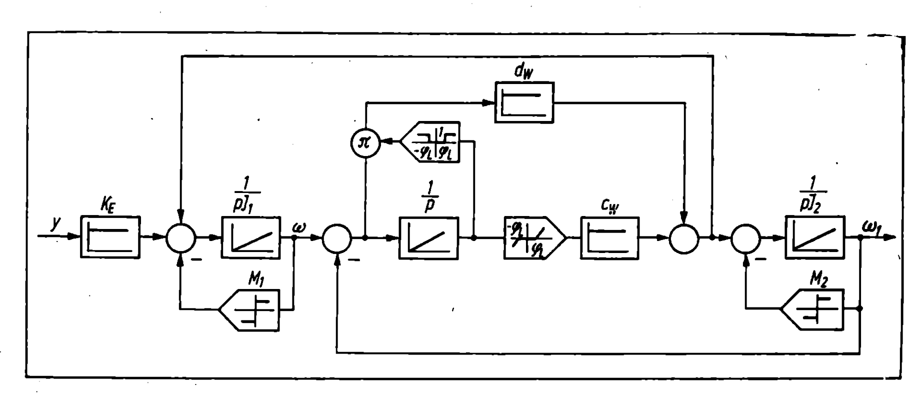


Bild 2. Signalflußbild des mechanischen Übertragungssystems

Parameter: $K_E = 0{,}862$ As, $J_1 = 2{,}27 \cdot 10^{-3}$ Nms², $M_1 = 0{,}49$ Nm, $J_2 = 0{,}981 \cdot 10^{-4}$ Nms², $M_2 = 0{,}45$ Nm, $c_W = 22{,}27$ Nm/rad, $d_W = 1{,}962 \cdot 10^{-3}$ Nms, $\varphi_L = 3{,}75 \cdot 10^{-3}$ rad

[1]) Mitteilung aus der TH Karl-Marx-Stadt, Sektion Automatisierungstechnik, WB Technische Kybernetik.

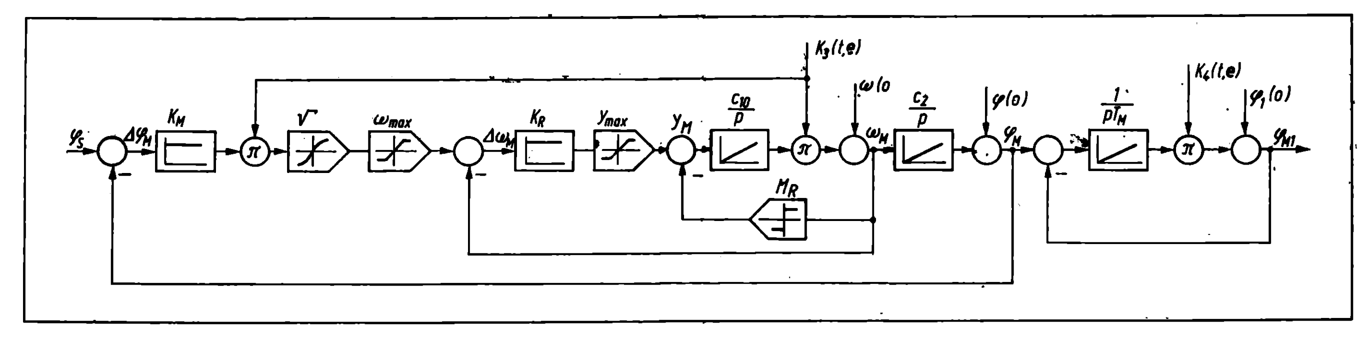


Bild 3. Vergleichsmodell

Parameter: $c_{10} = 363{,}5 \cdot 1/\mathrm{Vs}^2$, $c_2 = 1$, $M_\mathrm{R} = 1{,}09$ V, $T_\mathrm{M} = 2$ ms, $K_\mathrm{M} = 7270{,}2 \cdot 1/\mathrm{s}^2$, $K_\mathrm{R} = 2{,}8$ Vs, $\omega_{\max} = 157{,}08$ rad/s, $y_{\max} = 10$ V, $K_3(0) = 1$, $K_4(0) = 1$

Der in [2] über das Stabilitätsverfahren von *Ljapunov* hergeleitete Adaptionsalgorithmus hat folgende Form:

$$K_1(t, e) = -\alpha_1 c_{10} \int_0^t (e_1 r_{11} + e_2 r_{12})\, \varphi_0 \operatorname{sign} \Delta\varphi \, d\tau - \beta_1 c_{10}(e_1 r_{11} + e_2 r_{12})\, \varphi_0 \operatorname{sign} \Delta\varphi\,, \tag{1}$$

$$K_2(t, e) = -\alpha_2 c_{10} \int_0^t (e_1 r_{11} + e_2 r_{12})\, \omega_0 \operatorname{sign} \omega \, d\tau - \beta_2 c_{10}(e_1 r_{11} + e_2 r_{12})\, \omega_0 \operatorname{sign} \omega\,. \tag{2}$$

Für die Bildung der Zustandsfehler gilt jetzt: $e_1 = \omega - \omega_\mathrm{M}$ und $e_2 = \varphi_1 = \varphi_{\mathrm{M1}}$. Wie φ_{M1} als Ausgangsgröße des Vergleichsmodells entsteht, ist aus Bild 3 ersichtlich. Gegenüber [2] wurden einige Parameter anders gewählt. Hier sind:

$$r_{11} = 4{,}9 \cdot 10^{-4}\ \mathrm{s}^2\,, \quad r_{12} = 2{,}45 \cdot 10^{-2}\ \mathrm{s}\,,$$

$$\alpha_1 = 198{,}5\ \mathrm{V}^2\,, \quad \beta_1 = 198{,}5\ \mathrm{V}^2\,\mathrm{s}, \quad \alpha_2 = 0{,}127\ \mathrm{V}^2\,\mathrm{s}^2\,,$$

$$\beta_2 = 0{,}127\ \mathrm{V}^2\,\mathrm{s}^3\,, \quad \varphi_0 = \pi\,, \quad \omega_0 = 157{,}08\ \mathrm{rad\ s}^{-1}\,.$$

Durch das vergrößerte r_{12} wird der Lagefehler e_2 im Adaptivkreis stärker wirksam.

Damit die Adaption auch bei Stellsignalbegrenzung arbeiten kann, sind in [2] noch ein Algorithmus zur Modellanpassung und ein Steueralgorithmus zur Umschaltung zwischen Adaption und Modellanpassung angegeben. Unter Beibehaltung der grundsätzlichen Struktur des Vergleichsmodells und des Adaptions- sowie Modellanpaßalgorithmus soll nun erreicht werden, daß auch für die kompliziertere Struktur des Lageregelkreises eine Adaption möglich ist. Dazu sind einige zusätzliche Maßnahmen notwendig.

2. Maßnahmen zum Ausgleich der Strukturunterschiede

2.1. *Kompensation der Stellsignalverzögerung*

Das PT_1-Glied im Lageregelkreis nach Bild 1 wird zuerst vernachlässigt, um die Wirkung der Stellsignalverzögerung deutlicher zu zeigen. Welche Folgen die Stellsignalverzögerung für den Übergangsvorgang hat, zeigt Bild 4 am ersten Teil des Gesamtvorgangs bis $t = 0{,}2$ *s*. Aufgrund der verzögerten Umschaltung von y entsteht eine Geschwindigkeitsabweichung e_1, die wegen der Stellsignalbegrenzung nicht mehr abgebaut werden kann.

Ein Abbau des Geschwindigkeitsfehlers ist nur möglich, wenn das Stellsignal kurzzeitig erhöht werden kann. Diese kurzzeitige Erhöhung kann in Abhängigkeit vom P-Teil des Adaptionsalgorithmus des veränderlichen Parameters $K_1(t, e)$ gesteuert werden. Der Parameter $K_1(t, e)$ wird deshalb gewählt, weil er im Geschwindigkeitsregelkreis wirkt und hier ein Geschwindigkeitsfehler zu beseitigen ist. Für die jetzt veränderliche Stellsignalbegrenzung gilt dann:

$$y_{\max} = y_{\max}(0) + K_\mathrm{B} |(r_{11} e_1 + r_{12} e_2)\, \omega_0| \operatorname{sign} \omega\,. \tag{3}$$

Für $y_{\max}$ wird eine obere Grenze von $2y_{\max}(0)$ festgelegt, wobei $y_{\max}(0)$ die bisherige Begrenzung ist. Der Faktor K_B muß in zweckmäßiger Weise gewählt werden. Für das betrachtete Beispiel wurde $K_\mathrm{B} = 16{,}5$ V gesetzt.

Die Wirkung der kurzzeitigen Erhöhung des Stellsignals zeigt Bild 4 im zweiten Teil des Vorgangs für $0{,}2\ \mathrm{s} < t \leq 0{,}4$ s. Bei kleinem Sollwertsprung besteht die Möglichkeit, daß trotz der Erhöhung des Stellsignals ein Winkelgeschwindigkeitsfehler nicht mehr abgebaut werden kann. In dem Fall tritt ein Überschwingen der Lage auf. Eine grobe Abschätzung ergibt, daß für eine Übergangszeit des Stellsignals y vom positiven zum negativen Grenzwert oder umgekehrt, die unter 10% der Zeit für den Gesamtvorgang liegt, noch das gewünschte Verhalten auftritt.

Kleinere Sollwertsprünge als ein bestimmter Grenzwert dürfen dann nicht zugelassen werden, oder dafür ist eine feste Parametereinstellung zu wählen, die für die ungünstigste mögliche Parameterkombination optimal ist. Die Optimierung der festen Parametereinstellung muß für den kleinsten Sollwertsprung erfolgen, der durch das adaptive System noch beherrscht wird. Für alle Sollwerte, die darunter liegen, wird der Übergangsvorgang länger als für die jeweilige optimale Einstellung, aber ein Überschwingen der Lage kann nicht auftreten. Damit ist zumindest für einen Teil der möglichen Sollwertsprünge annähernd optimales Verhalten durch Anwendung der Adaption gesichert.

Nicht betrachtet wurde hier die Frage, ob eine kurzzeitige Erhöhung des Stellsignals möglich ist. Im allgemeinen ist aber vorauszusetzen, daß leistungselektronische Bauelemente und Motoren kurzzeitig mit mehrfachem Nennwert belastbar sind, es muß nur die Einhaltung der maximalen Verlustleistung im Mittel gewährleistet sein.

2.2. *Berücksichtigung der Übertragungsmechanik*

Als erstes soll die grobe Näherung der Übertragungsmechanik durch das PT_1-Glied entsprechend Bild 1 betrachtet werden. Der unterlagerte Regelkreis für das Stellsignal y wird beibehalten.

Da im Positionierfall die Strecke über längere Zeit ein konstantes Eingangssignal erhält (durch die Stellsignalbegrenzung), kommt dann nur das Übertragungsverhalten der Strecke zur Wirkung. Für das Übertragungsverhalten der Strecke ist es gleich, ob das PT_1-Glied in der Mitte oder am Ende steht. Im Vergleichsmodell kann damit das PT_1-Glied an das Ende der Strecke gesetzt werden. Es wird weiterhin die Lage φ_M im Vergleichsmodell geregelt, während der Ausgang des PT_1-Gliedes φ_{M1} zur Bildung des Zustandsfehlers e_2 verwendet wird. Im Vergleichsmodell kann dann weiterhin der Lageregler mit Wurzelkennlinie angewendet werden. Der Gesamtvorgang ist dann nicht mehr optimal, es wird aber ein Überschwingen über die Sollage verhindert. Der letzte Abschnitt des Übergangsvorgangs wird durch das Verhalten des PT_1-Gliedes bestimmt. Ist die Zeitkonstante sehr klein, bringt die gewählte Struktur keine wesentliche Verschlechterung gegenüber dem optimalen Fall. Die veränderte Struktur des Vergleichsmodells ist im Bild 3 angegeben.

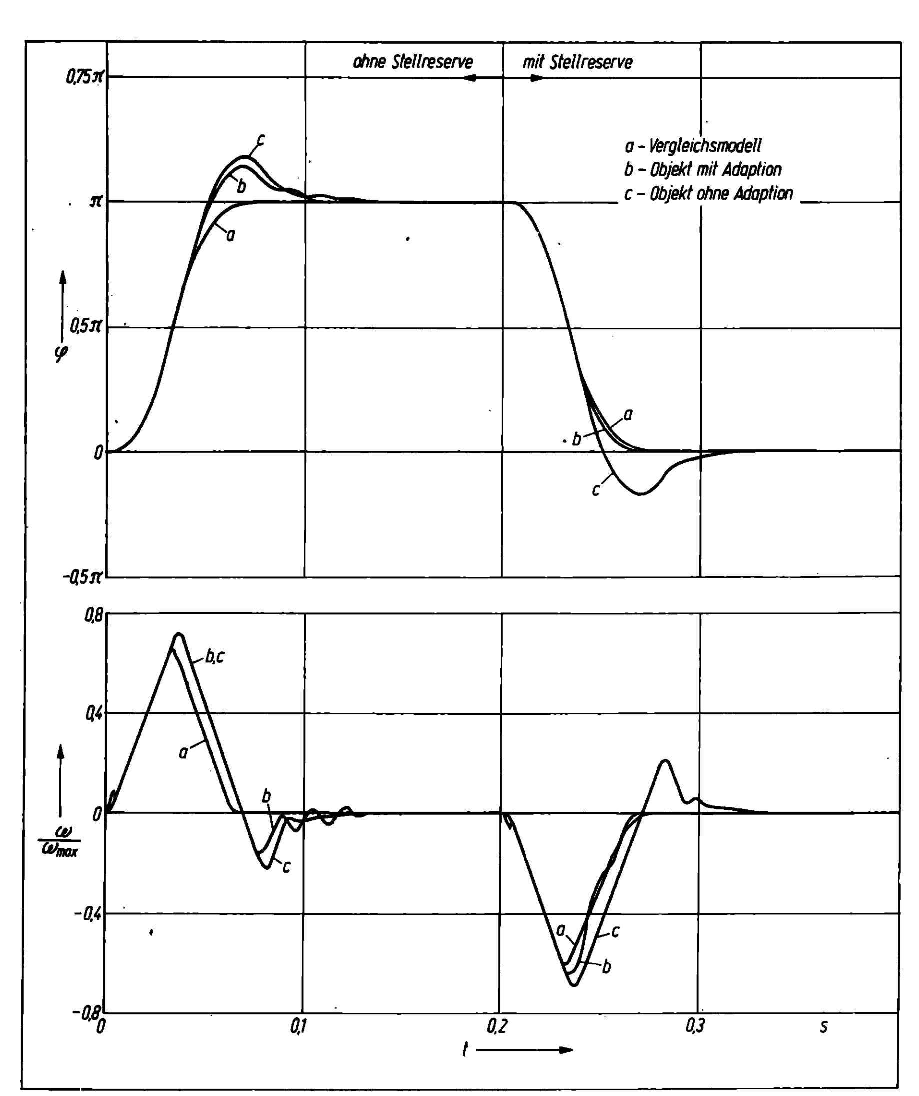
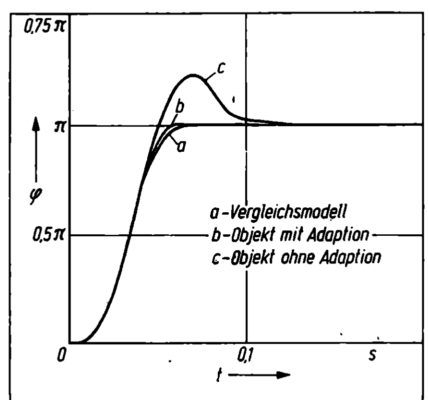


Bild 4. Zeitverlauf der Lage und der Winkelgeschwindigkeit bei Objekt mit Stellsignalverzögerung

Bild 5. Zeitverlauf der Lage bei Objekt nach Bild 1



Für die Anpassung von K_3 wurde in [2] folgender Algorithmus erarbeitet:

$$K_3(t, e) = K_3(0) - \alpha_3 c_{10} K_R \int_0^t (r_{11} e_1 + r_{12} e_2)\, \omega_0 \operatorname{sign} \Delta\omega_M \, d\tau \,. \tag{4}$$

Über den zweiten veränderlichen Übertragungsfaktor K_4 kann auch die Zeitkonstante des PT_1-Gliedes nach einem ähnlichen Algorithmus identifiziert werden. Mit dem Ansatz einer Ljapunov-Funktion läßt sich für K_4 ein I-Algorithmus erhalten:

$$K_4(t, e) = K_4(0) + \alpha_4 \frac{1}{T} \int_0^t (r_{13} e_1 + r_{23} e_3 + r_{33} e_2) \times$$

$$\times \varphi_0 \operatorname{sign} (\varphi_M - \varphi_{M1})\, d\tau \,. \tag{5}$$

Hierbei ist $e_3 = \varphi - \varphi_M$. Bei der Simulation wurden folgende Parameter gewählt: $r_{13} = 1{,}935 \cdot 10^{-10}\,\mathrm{s\,m^{-1}}$, $r_{23} = -2{,}936 \times$ $\times\, 10^{-7}\,\mathrm{m^{-1}}$, $r_{33} = 3{,}183 \cdot 10^{-7}\,\mathrm{m^{-1}}$, $\alpha_4 = 5{,}16 \cdot 10^9$.
Die Bedingung, daß die Gleichung

$$-\boldsymbol{Q} = (\boldsymbol{A}_M^T \boldsymbol{R} + \boldsymbol{R} \boldsymbol{A}_M)\,, \tag{6}$$

erfüllt sein muß, wobei $\boldsymbol{Q}$ und $\boldsymbol{R}$ positiv definite symmetrische Matrizen sind, ist damit gesichert. Die Zeitkonstante des PT_1-Gliedes ist $T = 2$ ms und im Vergleichsmodell $T_M = 2$ ms. Im Bild 5 ist ein Vorgang dargestellt mit $\varphi_s = \pi$. Die Adaption erreicht die fast vollständige Übereinstimmung von Modell- und Objektverhalten.

Bei Veränderung der Struktur der Regelstrecke durch die Berücksichtigung der Übertragungsmechanik nach Bild 2 kann keine Anpassung von K_4 erfolgen. Der Strukturunterschied zwischen Modell und Objekt wird insbesondere durch die nichtlinearen Glieder zu groß. Die Zeitkonstante T_M im Vergleichsmodell wird für das Beispiel weiterhin $T_M = 2$ ms gesetzt, das entspricht der mittleren Verzögerung durch das mechanische System. Im Bild 6 ist ein Übergangsvorgang für die vollständige Systemstruktur gezeigt. Die Lageabweichung zwischen Modell und Objekt am Ende des Übergangsvorgangs wird deutlich sichtbar. Durch Optimierung des Adaptivkreises und durch die richtige Wahl der Zeitkonstante T_M erfolgt kein Überschwingen der Lage.

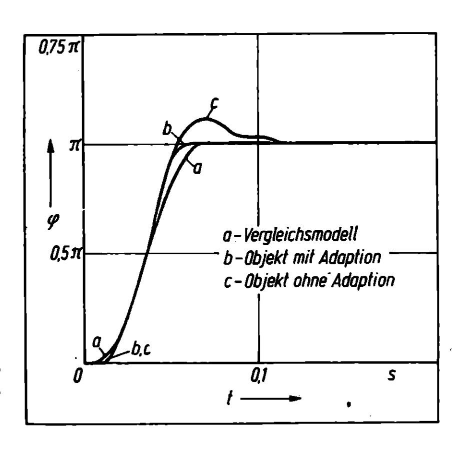


Bild 6. Zeitverlauf der Lage bei vollständiger Objektstruktur

3. Schlußfolgerung

Die Anwendung der Vergleichsmodelladaption bei wirksamer Stellsignalbegrenzung und unterschiedlicher Struktur von Modell und Objekt ist möglich, wenn zum Ausgleich dessen zusätzliche Maßnahmen ergriffen werden. Die durch zusätzliche Speicher im Objekt auftretenden Verzögerungen von Signalen sind durch kurzzeitige Anhebung der Stelleistung bzw. durch Verzögerung von Ausgangssignalen des Vergleichsmodells in gewissem Maße auszugleichen. Die Optimalität des Verhaltens ist damit nicht vollständig zu erreichen, die Abweichungen vom Optimum bleiben aber gering.
Unterschreitet der Sollwertsprung eine bestimmte Größe, kann der Strukturunterschied nicht mehr ausgeglichen werden. Unterhalb des minimal zu beherrschenden Sollwertsprungs kann die Einstellung für die ungünstigste Parameterkombination erfolgen. Die Entscheidung, ob die Adaption einzuschalten ist oder ob mit fester Parametereinstellung gearbeitet werden muß, hat durch ein übergeordnetes Steuerungssystem zu erfolgen.

Literatur

[1] *Landau, I. D.; Courtiol, B.:* Design of multivariable adaptive model following control systems. Automatica, Vol. 10 (1974) No. 5, pp. 483–494.

[2] *Janke, L.:* Adaption mit Vergleichsmodell bei wirksamer Stellsignalbegrenzung. msr 23 (1980) H. 11, S. 611–614.

[3] *Seyfarth, K.; Janke, L.:* Zur Modellstruktur elektromechanischer Systeme mit Spiel im Übertragungsweg. msr 23 (1980) H. 9, S. 491–494.

[4] *Janke, L.:* Grundsatzuntersuchungen zur Vergleichsmodelladaption für die Lageregelung an Werkzeugmaschinen als nichtlineare Systeme. Dissertation, TH Karl-Marx-Stadt (eingereicht 1981).

msr 7414

Prof. Dr.-Ing. habil. *E.-G. Woschni*, Karl-Marx-Stadt[1])

Korrekturmöglichkeit des Systemverhaltens durch Rechner-erhöhte Anforderungen an die Qualität der Originalsysteme

IA 4.0.5.

0. Einleitung

Von der Regelungstechnik her gesehen stellen die Meßeinrichtungen zur Messung der Führungsgröße sowie des Istwertes die Eingangssysteme einer Kettenschaltung von Systemen dar (Bild 1). Dabei können die Eigenschaften der Meßsysteme $G_{M_x}(j\omega)$ bzw. $G_{M_w}(j\omega)$ in den gesamten Führungsfrequenzgang $G_w(j\omega)$ einbezogen werden

$$G_w(j\omega) = \frac{\hat{X}e^{j\varphi}}{\hat{W}} = \frac{G_S(j\omega)\,G_R(j\omega)\,G_{M_w}(j\omega)}{1 + G_S(j\omega)\,G_R(j\omega)\,G_{M_x}(j\omega)} \quad (1)$$

und damit teilweise durch entsprechende Bemessung der Regelschleife korrigiert werden.
Generell kann man das Verhalten eines Systems bis zu einem gewissen Grad durch ein nachgeschaltetes System mit möglichst inversem Verhalten verbessern. Da moderne Meßgeräte, wie auch andere Systeme, in zunehmendem Maße über Mikrorechner zur Verarbeitung der Signale verfügen, liegt es nahe, diese Rechner durch eine zusätzliche Programmierung und damit oft ohne Aufwand an Hardware zur Korrektur zu benutzen.
Williams [1] stellte daher bereits 1969 in seinem Überblicksvortrag zum IFAC-Kongreß die Frage, ob die Qualität der Meßgeräte und insbesondere der Sensoren und damit der Originalsysteme i. allg. heute noch so entscheidend ist, da eine Korrektur mit ohnehin vorhandenen On-line-Rechnern realisiert werden kann. Angeregt durch diese Fragestellung konnte bereits kurze Zeit später aufgrund physikalischer Überlegungen durch den Autor gezeigt werden, daß für den Fall einer Korrektur des dynamischen Verhaltens die Qualität des Originalsystems von entscheidendem Einfluß auf die Wirksamkeit der Korrektur ist [2]. Weitere Arbeiten untermauerten diese Aussagen für PD-Programme [3] und [4]. In den letzten Jahren wurden ins einzelne gehende Untersuchungen über Korrekturmöglichkeiten und deren Effektivität bei verschiedenen Aufgabenstellungen, u. a. auch bezüglich einer Korrektur der statistischen Fehler durchgeführt [5] und [6]. Über die Ergebnisse hinsichtlich der Anforderungen an die Originalsysteme soll in diesem Beitrag zusammenfassend berichtet werden.

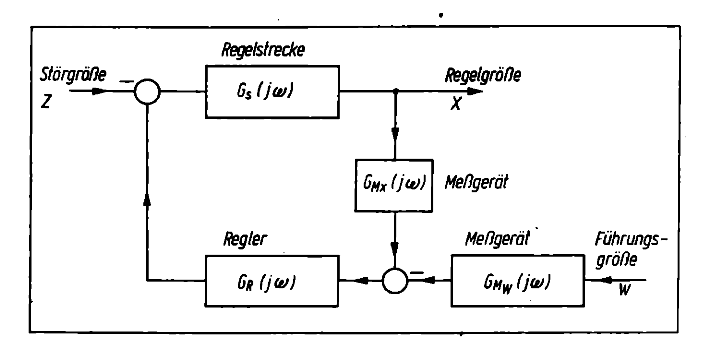


Bild 1. Meßeinrichtungen im Regelkreis

1. Kriterien zur Beurteilung der Verbesserung des Systemverhaltens

Zur Beschreibung der Güte Q eines Systems werden eine Reihe von Systemparametern T_r verwendet, mit dem Zusammenhang

$$Q = f(\boldsymbol{T}) , \quad (2)$$

wenn unter $\boldsymbol{T}$ der aus den Parametern T_r gebildete Vektor verstanden wird. Im allgemeinen werden hierzu zweckmäßig definierte Standardsignale sowohl für die Nutz- als auch für die Störsignale vorausgesetzt.
Aus der Gesamtzahl $\boldsymbol{T}$ der Systemparameter $T_r \in \boldsymbol{T}$ werden zur Beurteilung der Verbesserung des Systemverhaltens meist ein oder wenige besonders charakteristische Parameter $T_1 \ldots T_n$ ausgewählt:

$$Q = f(T_1 \ldots T_n) . \quad (3)$$

Systeme dienen zur Signalübertragung oder -verarbeitung mit Eingangssignalen $\boldsymbol{x}$ und Ausgangssignalen $\boldsymbol{y}$. Für das gewünschte Systemverhalten (ideales System, ideales Modell) gilt [7] und [8]:

$$\boldsymbol{y}_{id} = \boldsymbol{Op}_{id}\{\boldsymbol{x}\} , \quad (4)$$

[1]) Mitteilung aus der TH Karl-Marx-Stadt, Sektion Informationstechnik.

bzw. bei linearen Systemen für jede Signalkomponente x_r, y_r im Frequenzbereich mit dem Frequenzgang G_r

$$Y_{r\text{id}} = F\{Op_{r\text{id}}\} \cdot X_r = G_{r\text{id}} X_r \,. \tag{5}$$

Nach Bild 2 werden zur Beurteilung der Güte der Übertragung bzw. Signalverarbeitung das Ausgangssignal des realen Systems auch unter Berücksichtigung von Störungen $\boldsymbol{z}$ gebildet

$$\boldsymbol{y}_{\text{real}} = \boldsymbol{Op}_{\text{real}}\{\boldsymbol{x};\boldsymbol{z}\}\,, \tag{6}$$

bzw. im Zeitbereich — das Zeichen $\hat{+}$ berücksichtigt die Korrelation zwischen $\boldsymbol{x}$ und $\boldsymbol{z}$

$$Y_{r_{\text{real}}} = F\{Op_{r_{\text{real}_x}}\} \cdot X_r \,\hat{+}\, F\{Op_{r_{\text{real}_z}}\} \cdot Z_r\,, \tag{7}$$

mit dem idealen Ausgangssignal verglichen und eine Bewertung der Differenz $\boldsymbol{\varepsilon}$ durch ein Funktional g durchgeführt und damit ein Qualitätskriterium für die Signalübertragung bzw. -verarbeitung gewonnen

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{y}_{\text{id}} - \boldsymbol{y}_{\text{real}}\,, \qquad Q_s = g(\boldsymbol{\varepsilon})\,. \tag{8}$$

Als Funktional g wird in diesem Beitrag, wie auch sonst üblich, eine Bildung des quadratischen Mittelwertes $\overline{\varepsilon^2}$ verwendet [10], d. h., als Gütekriterium wird der mittlere quadratische Fehler eingeführt, mit seinem direkten Bezug zur Fehlerleistung, soweit nicht andere Parameter hinzukommen.

Oft lassen sich die Parameter des realen Systems nicht oder nur sehr schwierig beeinflussen [9]. In diesen Fällen wird zur Optimierung ein dem realen System nachgeschaltetes System, z. B. ein entsprechend programmierter Mikrorechner, verwendet, wie im Bild 2 gestrichelt skizziert ist. Damit lassen sich nach Gl. (8) die erreichbaren Verbesserungen des Systemverhaltens einschließlich der gegebenen Grenzen sowie des Einflusses der Güte des Originalsystems bestimmen, wie die folgenden Beispiele zeigen.

2. Systeme mit dynamischer bzw. statistischer Reserve

Im folgenden betrachten wir als wichtiges Beispiel ein System mit einem bandbegrenzten Eingangssignal und weißem Rauschen mit der spektralen Leistungsdichte als Nutz- und Störsignale

$$S_{xx}(\omega) = \frac{S_{xx_0}}{1 + (\omega/\omega_0)^2}\,; \qquad S_{zz}(\omega) = S_{zz_0}\,. \tag{9}$$

Die Grenzfrequenz des Originalsystems ω_{g_0} werde durch ein nachgeschaltetes System um den Faktor K auf

$$\omega_g = K\omega_{g_0} \tag{10}$$

geändert: Bei einem System mit dynamischer Reserve lassen sich damit die statistischen Fehler mit der Leistung P_z für $K < 1$ verringern (Integration am Systemausgang, z. B. durch einen entsprechend programmierten Mikrorechner), für ein System mit statistischer Reserve ist eine Verkleinerung der dynamischen Fehler $\overline{\varrho^2}$ auf Kosten der Störungen mit einem PD-Programm, d. h. $K > 1$ möglich. Unter der Voraussetzung eines idealen Tiefpaß-Verhaltens und nicht korrelierter Störungen erhält man für den mittleren quadratischen Fehler:

$$\overline{\varepsilon^2} = \overline{\varrho^2} + P_z = 2 \int\limits_{\omega_{g_0}\cdot K}^{\infty} S_{xx}(\omega)\,\mathrm{d}\omega + 2 \int\limits_{0}^{\omega_{g_0}\cdot K} S_{zz}(\omega)\,\mathrm{d}\omega\,. \tag{11}$$

Einsetzen von Gl. (9) liefert für den auf den Fehler des Originalsystems bezogenen mittleren quadratischen Fehler in Abhängigkeit vom Korrekturfaktor K:

$$\frac{\overline{\varepsilon^2}}{\overline{\varepsilon_0^2}} = \frac{K + \dfrac{S_{xx_0}}{S_{zz_0}} \dfrac{\omega_0}{\omega_{g_0}} \left[\dfrac{\pi}{2} - \arctan \dfrac{\omega_{g_0}}{\omega_0} \cdot K\right]}{1 + \dfrac{S_{xx_0}}{S_{zz_0}} \dfrac{\omega_0}{\omega_{g_0}} \left[\dfrac{\pi}{2} - \arctan \dfrac{\omega_{g_0}}{\omega_0}\right]}\,. \tag{12}$$

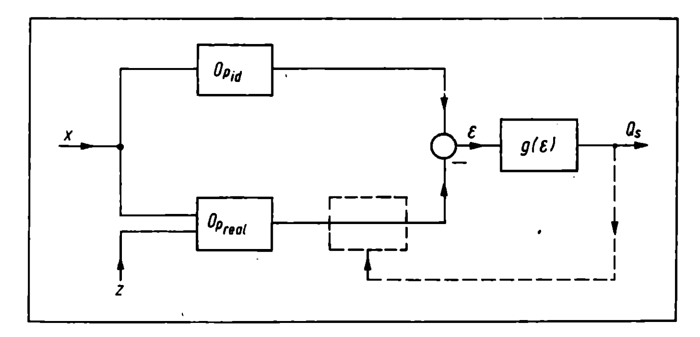


Bild 2. Zur Erläuterung der Bildung von Gütekriterien für Signalübertragung und -verarbeitung

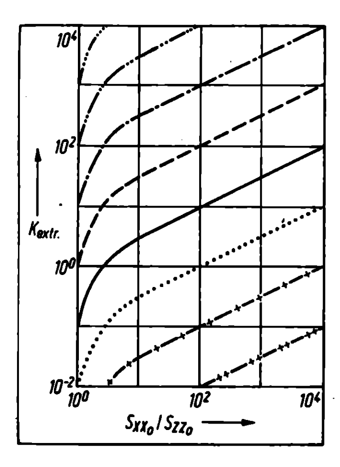


Bild 3. Optimale Werte für den Korrekturgrad K_{opt}

$\omega_{g_0}/\omega_0 = 10^3$ (— + + —); 10^2 (— + —) 10^1 (·····); 10^0 (———); 10^- (— — —); 10^{-2} (— · —); 10^{-3} (— ·· —); 10^{-4} (— ··· —)

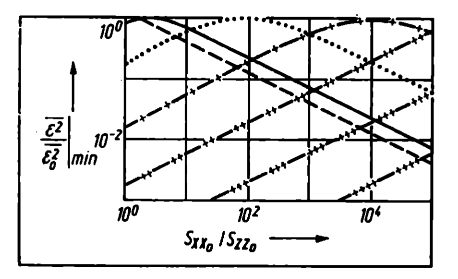


Bild 4. Beste Werte für die Fehler-Reduzierung

$\omega_{g_0}/\omega_0 = 10^5$ (— + + + + —); 10^4 (— + + + —); 10^3 (— + + —); 10^2 (— + —); 10^1 (····); 10^0(———); $\leqq 10^{-1}$ (— — —)

Nähere Einzelheiten bezüglich der erhaltenen numerischen Ergebnisse und der physikalischen Erklärung für das Verhalten sind in [11] dargestellt. Aus Gl. (12) folgt der optimale Wert des Korrekturfaktors K_{opt} für das Extremum:

$$K_{\text{opt}} = \frac{\omega_0}{\omega_{g_0}} \sqrt{\frac{S_{xx_0}}{S_{zz_0}} - 1} \approx \frac{\omega_0}{\omega_{g_0}} \sqrt{\frac{S_{xx_0}}{S_{zz_0}}}\,, \tag{13}$$

und nach Einsetzen von Gl. (13) in Gl. (12) erhält man für den minimalen Wert des erreichbaren Fehlers und damit für den günstigsten Wert der Verbesserung des Systemverhaltens

$$\left.\frac{\overline{\varepsilon^2}}{\overline{\varepsilon_0^2}}\right|_{\min} = \frac{\dfrac{\omega_0}{\omega_{g_0}} \left\{\sqrt{\dfrac{S_{xx_0}}{S_{zz_0}} - 1} + \dfrac{S_{xx_0}}{S_{zz_0}} \left[\dfrac{\pi}{2} - \arctan \sqrt{\dfrac{S_{xx_0}}{S_{zz_0}} - 1}\right]\right\}}{1 + \dfrac{\omega_0}{\omega_{g_0}} \dfrac{S_{xx_0}}{S_{zz_0}} \left[\dfrac{\pi}{2} - \arctan \dfrac{\omega_{g_0}}{\omega_0}\right]}\,. \tag{14}$$

Die Bilder 3 und 4 zeigen die Ergebnisse der Berechnungen für verschiedene System- und Signalparameter. Man erkennt, daß 3 Fälle auftreten: Entweder es existiert ein Minimum für den Fehler mit einem optimalen Wert K_{opt}, oder das Optimum liegt

bei $K_{opt} = 1$ (keine Korrektur zweckmäßig), bzw. der Wert liegt bei $K_{opt} \to 0$ bzw. ∞. Grundsätzlich sind die „dynamische Redundanz“ ω_{g_e}/ω_0 und die „statistische Redundanz“ S_{xx_e}/S_{zz_e} entscheidend für die Wirksamkeit der Korrektur. Damit zeigen die numerischen Berechnungen, daß die Güte des Originalsystems von ausschlaggebendem Einfluß für die Effektivität der Korrektur ist. Nähere Einzelheiten für verschiedene Kombinationen von Parametern werden in [3] bis [5] und [11] diskutiert und Erklärungen für das Verhalten aufgrund der physikalischen Anschauung gegeben.

Ferner zeigen Untersuchungen der Parameterempfindlichkeit sowie der Auswirkungen von Nichtlinearitäten, daß diese Einflüsse um so störender in Erscheinung treten, je höher der Korrekturgrad ist [12]. Gegebenenfalls sind dann weitere Korrekturprogramme bzw. adaptive Programme notwendig zur Berücksichtigung auch dieser Faktoren.

Der zu den optimalen Werten gehörende bezogene Wert des erreichbaren Nachrichtenflusses nach der Definition [7] und [13]

$$\frac{J_{opt}}{J_0} = K \frac{{}^2\log\,[1 + Pa/\overline{\varepsilon^2_{min}}]}{{}^2\log\,[1 + Pa/\overline{\varepsilon^2_0}]} \tag{15}$$

zeigt für $K > 1$ mit der Güte der Systeme steigende Tendenz, für $K < 1$, d. h. bei Mittelwertbildung, nimmt er ab [5] [14] und [15].

3. Erreichbare Verbesserungen durch Rückrechnung mitnahmebedingter Frequenzfehler

Als weiteres Beispiel sei der Fall der Korrektur der Fehler betrachtet, die durch Mitnahmeeffekte, z. B. bei hochgenauen Frequenzmessungen, entstehen. Genauere Untersuchungen zeigen nämlich, daß stets auch außerhalb der unvermeidlichen Synchronisationsbereiche der Breite $\Delta\omega_0$ Frequenzbeeinflussungen und damit tatsächliche Differenzfrequenzen $\Delta\omega_{real}$ auftreten, die von der Differenzfrequenz ohne Mitnahme $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$ nach der Beziehung

$$\Delta\omega_{real} = \sqrt{\Delta\omega^2 - \Delta\omega_0^2} \tag{16}$$

abhängen. Dieser Effekt spielt z. B. bei Meßverfahren zur Messung der Frequenz nach dem Prinzip des Vergleichs mit einer Referenzfrequenz eine Rolle [17]. Der relative Fehler bei der Messung der Differenzfrequenz F_d^* beträgt damit

$$F_d^* = \frac{\Delta\omega_{real} - \Delta\omega}{\Delta\omega} \approx (-)\,\frac{1}{2}\,\frac{\Delta\omega_0^2}{\Delta\omega^2} \tag{17}$$

oder, bezogen auf die zu messende Frequenz ω_2,

$$F_2^* = F_d^* \frac{\Delta\omega}{\omega_2} \approx (-)\,\frac{1}{2}\,\frac{\Delta\omega_0^2}{\omega_2^2}\cdot\frac{\omega_2}{\Delta\omega}. \tag{18}$$

Nach Gl. (16) lautet das ideale Korrekturprogramm

$$\Delta\omega = \sqrt{\Delta\omega_{real}^2 + \Delta\omega_0^2}\,. \tag{19}$$

Wie Messungen zeigen [16], gilt Gl. (16) und damit auch Gl. (19) um so besser, je kleiner $\Delta\omega_0/\Delta\omega$ wird. Nimmt man anstelle Gl. (19) das linearisierte Programm

$$\Delta\omega \approx \Delta\omega_{real}\left(1 + \frac{1}{2}\,\frac{\Delta\omega_0^2}{\Delta\omega_{real}^2}\right), \tag{20}$$

so kann man den verbleibenden Fehler F_d^{**} näherungsweise abschätzen zu

$$F_d^{**} \approx (-)\,\frac{1}{8}\,\frac{\Delta\omega_0^4}{\Delta\omega_{real}^4}. \tag{21}$$

Der verbleibende Fehler und damit die Wirksamkeit der Korrektur hängen also auch in diesem Fall von der Güte des Originalsystems, beschrieben durch die Mitnahmebreite $\Delta\omega_0$, d. h. genauer von der auf die Frequenzabweichung bezogenen Mitnahmebreite, entscheidend ab.

Zusammenfassung

Nach einem Überblick über Kriterien zur Beurteilung der Güte von Systemen und damit der durch Korrekturprogramme erreichbaren Verbesserung des Systemverhaltens wird der mittlere quadratische Fehler als Gütekriterium herausgestellt. Unter Benutzung dieses Kriteriums werden anschließend als 2 wichtige Beispiele Systeme mit „dynamischer Reserve“ sowie solche mit „statistischer Reserve“ behandelt. Für erstere ergibt sich die Möglichkeit, durch I-Programme u. U. eine Verbesserung des Verhaltens gegenüber Störungen auf Kosten größerer dynamischer Fehler zu erreichen, bei den Systemen mit „statistischer Reserve“ durch PD-Programme das dynamische Verhalten auf Kosten des statistischen Verhaltens zu verbessern. Quantitative Berechnungen zeigen, daß die Güte des Originalsystems entscheidenden Einfluß auf die erreichbaren Verbesserungen hat. Auf Grenzen infolge der sich erhöhenden Parameterempfindlichkeit sowie der Auswirkungen von Nichtlinearitäten wird besonders hingewiesen.

Zu grundsätzlich denselben Schlußfolgerungen kommt man bei Systemen mit Synchronisationseffekten, die z. B. zur Frequenzmessung eingesetzt werden. Es läßt sich daher vermuten, daß diese Aussagen generell gelten, womit die in [1] gestellte Frage — zumindest in den hier behandelten Fällen — dahingehend zu beantworten ist, daß mit dem Einsatz von Korrekturrechnern die Anforderungen an die Güte der Originalsysteme ansteigen. Die in [1] geäußerte Vermutung, daß die Güte dieser Systeme wegen der Korrekturmöglichkeiten in Zukunft keine so entscheidende Rolle mehr spielen wird, ist daher ein Trugschluß.

Literatur

[1] *Williams, Th. J.*: Interface Requirements, Transducers and Computers for On-Line-Systems. Survey Paper. IFAC-Kongreß, Warschau 1969.
[2] *Woschni, E.-G.*: Inwieweit spielt die Qualität eines Meßgrößenaufnehmers beim Einsatz von On-Line-Rechnern noch eine Rolle? msr **12** (1969) H. 10, S. 384 und 385.
[3] *Woschni, E.-G.*: Anwendungsmöglichkeiten von Minirechnern zur dynamischen Systemkorrektur. Nachrichtentechnik-Elektronik **27** (1977) H. 1, S. 27.
[4] *Woschni, E.-G.*: Efficiency and Limits of Programs for Dynamic Error Correction and Deduction to Practical Application. Proc. IMEKO TC 7 Symposium, Leningrad, Mai 1978.
[5] *Woschni, E.-G.*: Zur Reduzierung der Meßfehler mittels statistischer Auswertung, insbesondere durch den Einsatz von Mikrorechnern. msr **23** (1980) H. 5, S. 274.
[6] *Woschni, E.-G.*: Einsatzmöglichkeiten von Mikroprozessoren zur Korrekturrechnung der durch Synchronisationseffekte bedingten Fehler bei hochgenauen Frequenzmessungen. Wiss. Zeitschr. der TH Karl-Marx-Stadt **20** (1978) H. 5, S. 665—668.
[7] *Woschni, E.-G.*: Informationstechnik. Berlin: VEB Verlag Technik; Heidelberg: A. Hüthig Vrelag, 1973.
[8] *Zadeh, L. A., Desoer, L. A.*: Linear System Theory. New York/San Francisco/Toronto/London: McGraw Hill 1963.
[9] *Woschni, E.-G.*: Einige Optimierungskriterien in informationstheoretischer Sicht und Beispiele für deren Verwendung. Sitzungsbericht des Plenums und der Klassen der AdW der DDR. Berlin: Akademie-Verlag 1973.
[10] *Schlitt, H.*: Systemtheorie regelloser Vorgänge. Westberlin/Göttingen/Heidelberg: Springer-Verlag 1960.
[11] *Woschni, E.-G.*: Reduction of either statistical or dynamic errors in measurement by means of correction programs or networks and demands to the quality of the systems. Zeitschrift für Elektrische Informations- und Energietechnik **10** (1980) H. 5, S. 435—444.
[12] *Woschni, E.-G.*: Parameterempfindlichkeit in der Meßtechnik, dargestellt an einigen Beispielen. msr **10** (1967) H. 4, S. 124—130.
[13] *Shannon, C. E.*: The mathematical Theory of communication. Urbana: The University of Illinois Press 1949.
[14] *Woschni, E.-G.*: Vergleichende Untersuchungen über den Nachrichtenfluß in normalen, nicht korrigierten Systemen, ideal korrigierten Systemen und Systemen mit Optimalfiltern. Arch. der elektr. Übertr. **18** (1964) S. 725 bis 731.
[15] *Woschni, E.-G.*: Dynamics of measurement — relations to system and information theory. Journal of Physics, E: Scientific Instruments **10** (1977) pp. 1081—1092.
[16] *Woschni, E.-G.*: Über mitnahmebedingte Frequenzverwerfungen bei LC-Oszillatoren. Nachrichtentechnik-Elektronik **5** (1955) H. 6, S. 251.
[17] *Woschni, E.-G.*: Optimum Difference Frequency for highly accurate Measurement of industrial Parameters by Measurement of Frequency. Preprints, IMEKO VII, London 1976, No. 3, pp. 315.

msr 7432

Programmierbare nichtnumerische Steuerungen (X)[1]

Dr.-Ing. *G. Roland*, Karl-Marx-Stadt

Programmierbares Steuerungs- und Baugruppensystem PS 2000

IA 1.1.1.2.; 2.4.1.1

Die externe Voreinstellung erfolgt mit BCD-Vorwahlschaltern, deren Informationen zur Störunterdrückung einer Potentialtrennung unterzogen werden. Mittels der Zähltakte zählt der BCD-Zähler vom voreingestellten Wert aus rückwärts zum Wert Null. Die Zählerausgänge sind mittels der Eingangsadressierung abfragbar. Sie werden außerdem durch die Koinzidenzschaltung ausgewertet, die bei Zählerstand „Null" ebenfalls eine Information an die Eingangsadressierung übermittelt. Dieses Signal definiert das Erreichen des gewählten Zeitwertes. Zählerausgänge und Koinzidenzsignal sind mittels Prüfadapter anzeigbar. Die programmierbare Rücksetzinformation gestattet die Nullsetzung eines beliebigen Zählerstandes. Die Schaltung zur Potentialtrennung und Pegelwandlung dieser Information entspricht der Eingangsbaugruppe EG12. Mit der Zeitbaugruppe TDV läßt sich eine Langzeitkonstanz von ± 2% erreichen. Sie erfüllt sowohl die Forderung nach externer Wahl des Zeitwertes mit einer Stufung von 0,1 s als auch die Möglichkeit der programmierbaren Zeitdauer. Zum Anschluß der Voreinstelleingänge verfügt die Baugruppe über eine 20polige Steckerleiste.

1.3.3.2. Zählerbaugruppen CT10 und CT10V

Die beiden Zählerbaugruppen CT10 und CT10V beruhen auf einem 12 bit-BCD-Zähler, der durch Programmierung von Zähltakten Informationen aufnehmen kann. Das Bild 31 zeigt eine deutliche Ähnlichkeit zur Zeitbaugruppe TDV. Für die Baugruppe CT10 stellt der Ausgabespeicher die Informationen Zähltakt und Zählrichtung bereit (die gestrichelten Baugruppen entfallen bei CT10). Mit diesen Informationen kann die Zählerbaugruppe in beiden Zählrichtungen betrieben werden.

Die Baugruppe CT10V benötigt zusätzlich die Übernahmeinformation, um die extern voreingestellten Zählwerte dem BCD-Zähler zu übermitteln. Alle Schaltungsdetails entsprechen der Baugruppe TDV. Mittels der Zähltakte zählt der BCD-Zähler vom voreingestellten Wert aus rückwärts zum Wert Null.

Beide Zählerbaugruppen verfügen analog zur Baugruppe TDV über eine Abfrage aller Zählerausgänge mittels der Eingangsadressierung. Gleichzeitig erfolgt eine Auswertung durch eine Koinzidenzschaltung. Zählerausgänge und Koinzidenzsignal sind mittels Prüfadapter anzeigbar.

Die programmierbare Rücksetzinformation gestattet die Nullsetzung eines beliebigen Zählerstandes.

Die Baugruppe CT10V verfügt zum Anschluß der Voreinstelleingänge über eine 20polige Steckerleiste.

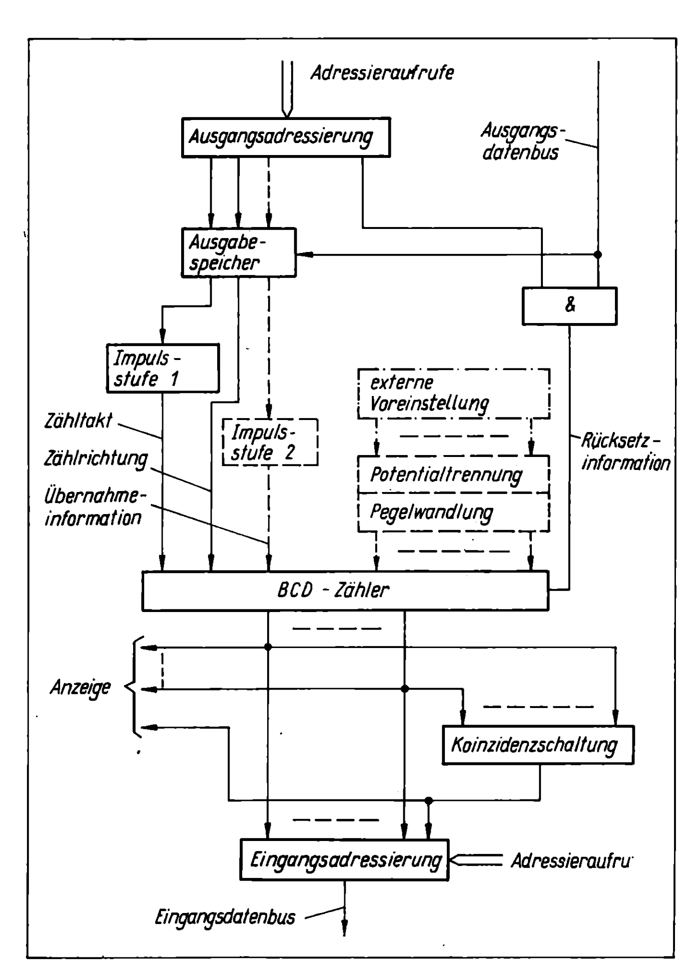


Bild 31. Zählerbaugruppen CT 10 und CT 10V

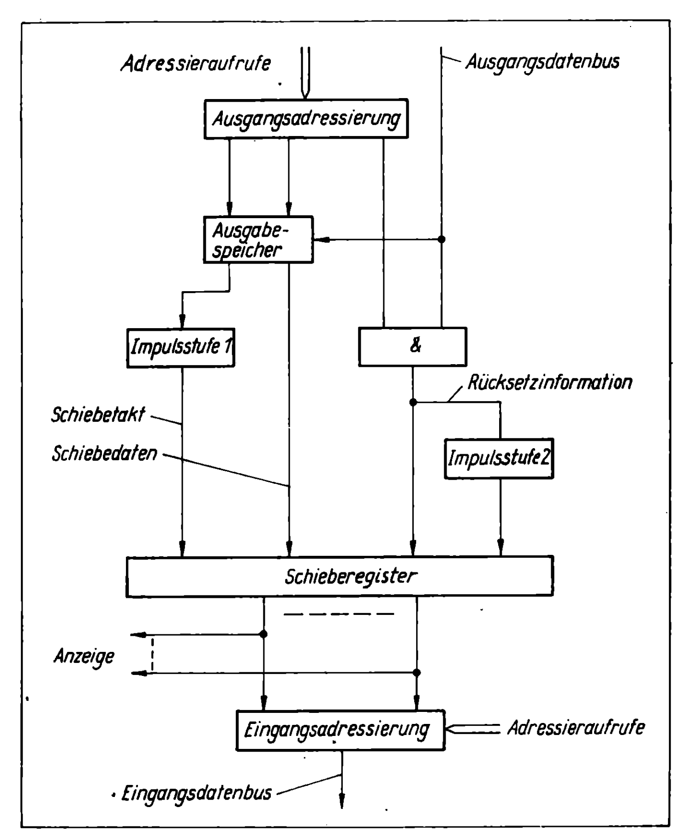


Bild 32. Schieberegister RG

1.3.3.3. Schieberegisterbaugruppe RG

Diese Peripheriebaugruppe realisiert ein 16-bit-Rechtsschieberegister. Entsprechend Bild 32 enthält der Ausgabespeicher die Information für den Schiebetakt und die Schiebedaten. Die Impulsstufe 1 bildet den Schiebetakt, der in Abhängigkeit von den Schiebedaten entweder ein H-Signal oder ein L-Signal durch das Schieberegister transportiert. Mit Hilfe der programmierbaren Rücksetzinformationen läßt sich das Schieberegister aus

[1]) Teil IX erschien im Heft 10/1981.

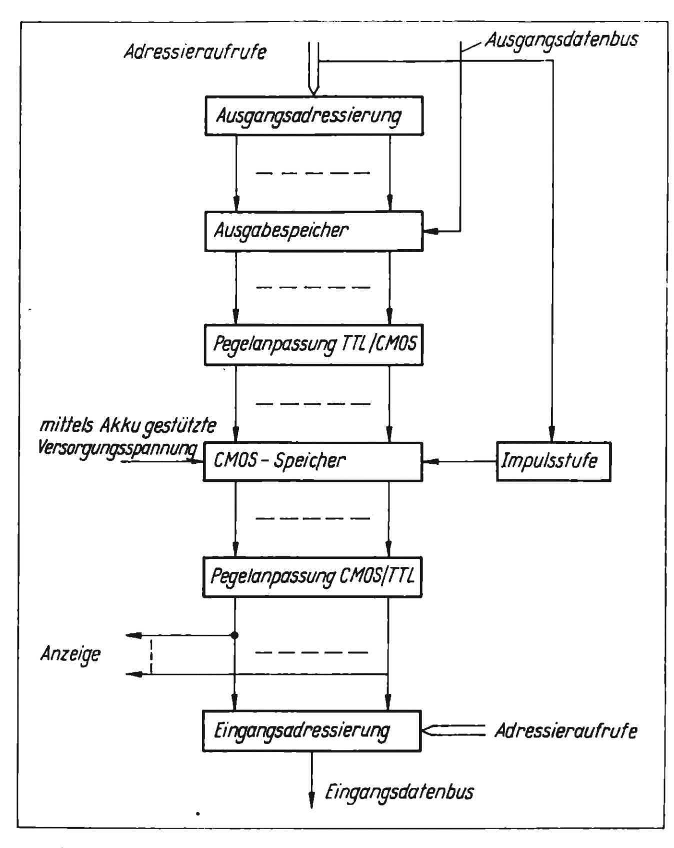


Bild 33. Haftspeicher HA

jedem Zustand auf Null zurücksetzen. Neben der programmierbaren und der durch die Überwachungsfunktionen ausgelösten Rücksetzinformation wird die zuverlässige Arbeitsweise der Schieberegisterbaugruppe durch Herstellung des Initialzustandes bei Zuschaltung der Versorgungsspannung +5 V gesichert (Impulsstufe 2). Alle 16 Ausgänge des Schieberegisters sind anzeigbar und mittels der Eingangsadressierung auf ihren Zustand abfragbar. Schieberegisterbaugruppen werden beispielsweise für die Nachbildung von Materialflüssen in Fertigungsprozessen gefordert.

1.3.3.4. Haftspeicherbaugruppe HA

Haftspeicherbaugruppen dienen der Erhaltung von logischen Verknüpfungsergebnissen während der Abschaltung der Versorgungsspannung. Wird die Versorgungsspannung in einem stationären Prozeßzustand abgeschaltet, dann bleibt dieser Zustand über einen definierten Zeitraum im Haftspeicher erhalten. Dadurch läßt sich der ursprüngliche Prozeßzustand bei erneutem Zuschalten der Versorgungsspannung rekonstruieren.

Die Baugruppe Haftspeicher HA realisiert acht Haftspeicherfunktionen. Den prinzipiellen Aufbau dieser Baugruppe zeigt Bild 33. Zunächst werden die zu speichernden Informationen analog wie bei den Ausgangsbaugruppen in dem Ausgabespeicher abgelegt. Sind diese acht Speicher beschrieben, erfolgt nach Bildung des Übernahmesignals in der Impulsstufe die gleichzeitige Übernahme der Ausgabespeicherinhalte in die acht CMOS-Speicher. Die eingesetzten CMOS-Bauelemente erfordern eingangs- und ausgangsseitig eine Pegelanpassung an die TTL-Bauelemente. Für die Stromversorgung der CMOS-Bauelemente wurde eine Versorgungsspannung von +9,5 V gewählt, die während der Abschaltung der Netzstromversorgung von einem in der Steuerung installierten Akkumulator bereitgestellt wird.

Die Ausgänge der CMOS-Speicher führen über die Pegelanpassung CMOS/TTL zur Eingangsadressierung, um die Speicherzustände auszuwerten. Außerdem sind die acht Speicherzustände mittels Prüfadapter anzeigbar.

Die Ausbildung des Taktsignales (Impulsstufe) für die CMOS-speicher gewährleistet, daß bei Spannungszuschaltung zunächst der Inhalt dieser Speicher verarbeitet wird, bevor diese mit neuen Informationen beschrieben werden.

msr 7177 (wird fortgesetzt)



Zwei Industrieroboter übernehmen im VEB Walzwerk Finow das versandfertige Stapeln von Profilen jeder Größe. Diese körperlich schwere Arbeit mußten bisher 6 Walzwerker bewältigen. Ein Rechner steuert auf der Basis eines vorgegebenen Programms den Einsatz der Roboter.

Dr.-Ing. *R. Wolf* und Dipl.-Ing. *K. Fiedler*, Magdeburg

Elektronische Schaltungen der Automatisierungstechnik (33) [1]

Mikroelektronikeinsatz — Überblick und Anwendungstechnik

IA 4.0.

Der sich herauszubildende Gleichgewichtszustand zwischen konventioneller und mikroprozessorgesteuerter Technik ist derzeitig noch nicht fixiert. Er wird bestimmt durch folgende Gesichtspunkte:

- Marktwirksamkeit ökonomischer Lösungen mit Mikroprozessorsystemen
- schrittweiser Ersatz konventioneller Anlagentechnik durch neue Anlagentechnik mit Mikroprozessorsystemen
- Bereitstellung von entsprechenden Geräten zur Wartung derartiger Anlagen und qualifizierter Fachkader.

3.3. Allgemeiner Industrieeinsatz

Die Zielstellung des allgemeinen Industrieeinsatzes von mikroprozessorgesteuerten Geräten und Anlagen ist hauptsächlich in der Rationalisierung und Arbeitszeiteinsparung zu sehen.
Man könnte hier folgende Einsatzgebiete unterscheiden:

- Montagetechnik (Bestückungsautomaten, Industrieroboter)
- spanende Fertigungstechnik (numerisch gesteuerte Maschinen und Werkzeugmaschinen)
- Meßtechnik (automatische Meßsysteme für Dauerlaufprüfung in der Zuverlässigkeit)
- Prüftechnik (Prüfung der Funktionen von Baugruppen bzw. vom Gesamtgerät)

Die Kosten für mikroprozessorgesteuerte Geräte oder Anlagen im Industrieeinsatz können über denen konventioneller Systeme liegen, da die Ökonomie dieser Geräte wesentlich durch ihre technischen Eigenschaften (Bearbeitungsgeschwindigkeit, Präzision) bestimmt wird und von den zu fertigenden Losgrößen abhängig ist. Weitere Anwendungsfälle sind [11] enthalten.

4. Verfügbare Bauelementebasis

4.1. Grundbausteine der Mikroelektronik

4.1.1. Mikroprozessoren (MP)

Mikroprozessoren setzen sich aus den Funktionsgruppen:

- Arithmetisch-logische Einheit (ALU)
- Befehlsdekoder
- Steuereinheit
- Registerblock (mit verschiedenen Speichern)
- Puffer

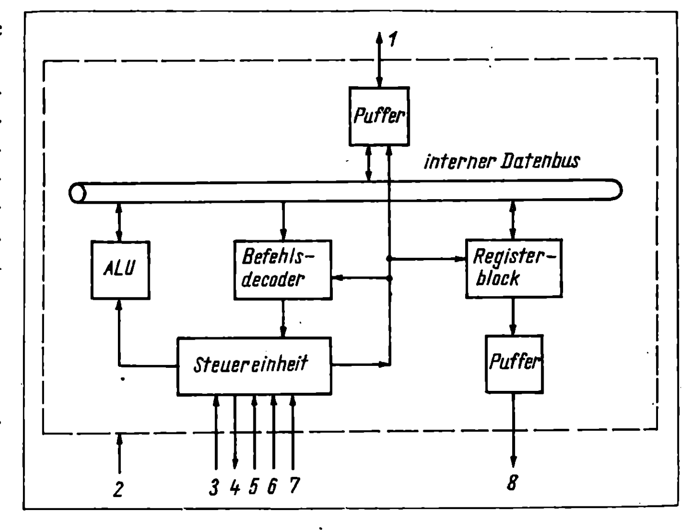
zusammen. Die innere Verbindung wird durch einen internen Datenbus hergestellt (Bild 9).
Die angegebenen Funktionseinheiten haben folgende Aufgaben:

- Arithmetisch-logische Einheit (ALU)
  Sie besteht aus dem Akkumulator (Ergebnisregister), temporären Registern zur Zwischenspeicherung von Daten, Bedingungs-Flip-Flops (Flags, werden in Abhängigkeit vom Ergebnis der Operation — Übertrag, Null, Parität o. ä. — gesetzt und gestatten Ruf-, Sprung-, Rücksprung- und Verzweigungsoperationen) und der Arithmetik-Logik-Einheit. Die ALU hat alle Verknüpfungsbefehle zu realisieren und stellt das Rechenwerk des Mikroprozessors dar.
- Befehlsdekoder
  Zum Befehlsdekoder gehören der Befehlszähler und ein zugehöriges Register, das im Registerblock untergebracht ist. Der Befehlszähler sendet eine Adresse aus, die aus ein oder zwei Worten bestehen kann. Nachdem die durch diese Adresse angeforderten Daten aus dem entsprechenden Speicherplatz gelesen sind, erfolgt automatisch die Erhöhung des Standes des Befehlszählers um eins. Die gelesenen Daten werden in einem Register zwischengespeichert. Das geschieht auch mit anderen Daten, die zur Befehlsabarbeitung in der ALU benötigt werden. Die Arbeit der ALU beginnt erst, wenn alle zur Operation notwendigen Daten in den Registern vorliegen.
- Steuereinheit
  Die Steuereinheit steuert die zeitliche Befehlsabarbeitung. Die Befehlsabarbeitung erfolgt in bis zu drei Maschinenzyklen, die wiederum mehrere Zeit- oder Taktzyklen umfassen.
  Die Steuereinheit wird von einem externen Taktgenerator angesteuert. Die Taktfrequenz beträgt maximal 500 kHz und ist typenspezifisch. Die Steuereinheit nimmt Unterbrechungs- und Bereitschaftssignale (Interrupt, Ready) entgegen und gibt Status- und Schreib-/Lesesignale aus. Diese Daten werden über den Befehlsbus den anderen Baugruppen des Systems, z. B. Speicher, übermittelt oder von dort geholt (fetch).
- Registerblock
  Der Registerblock ist ein Speicherblock zur Zwischenspeicherung von Daten. Ein Teil des Registerblocks ist reserviert als Kellerspeicher (Stack), Befehlszähler und Akkumulator. Daneben existieren noch eine Reihe freier Register, die für allgemeine Datenspeicherung vorgesehen sind.

Zu den Fragen des Programmablaufs und der Programmabarbeitung kann hier nicht Stellung genommen werden, da aufgrund einer, gemessen am notwendigen Datenfluß, geringen Anzahl von Verbindungen des Mikroprozessors der Betrieb multiplex bzw. geschachtelt erfolgen muß, damit der ganze Prozeß eine hohe Komplexität hat. Bekannte Mikroprozessortypen haben 18 bis 64 Anschlußstifte. Je geringer die Anzahl der Anschlußstifte, um so größer wird der Elektronikaufwand für die multiplexe Datenübertragung, und um so länger wird die Zeit zur Befehlsausführung.

Bild 9. Prinzipieller Aufbau eines Mikroprozessors nach [12]

1 Daten-Ein-/Ausgang; *2* Betriebsspannung; *3* Takt; *4* Status; *5* Interrupt; *6* Schreiben/Lesen; *7* Ready, *8* Adressenleitungen



[1] Teil 32 erschien im Heft 10/1981.

Neben den „Standard“-Varianten von Mikroprozessoren gibt es als Sondervarianten nach [12]:

— mikroprogrammierbare Mikroprozessoren
— Multiprozessorsysteme.

Die mikroprogrammierbaren Mikroprozessoren bestehen aus den Baugruppen Mikrospeicher, Mikroprogramm-Steuereinheit und Verarbeitungselement. Das Verarbeitungselement hat nur eine Wortlänge von 2 ... 4 bit und ist aufreihbar (bit-slice-Technik). So kann man einen Mikroprozessor entwickeln, der optimal an den Prozeß angepaßt ist und der wegen des spezifischen Programms eine kurze Befehlsabarbeitungszeit hat. Der Mikroprogrammspeicher ist ein gesonderter Schaltkreis, der gegebenenfalls ausgetauscht oder umprogrammiert werden kann. Trotz des erhöhten Programmieraufwandes scheinen sich mikroprogrammierbare Mikroprozessoren weiter durchzusetzen.
Multiprozessorsysteme bestehen aus mehreren Mikroprozessoren und Speichern, die aufgrund ihrer Leistungsfähigkeit in der Lage sind, selbst Großrechner zu ersetzen. Mit Hilfe von Multiprozessorsystemen ist man bezüglich der Einsatzbreite so variabel, daß eine relativ günstige Anpassung des Rechners an den Prozeß erreicht wird. Bekannt ist die Verbindung von 16 bis 256 Mikroprozessoren zu einem Multiprozessorsystem.

4.1.2. Halbleiterspeicher

Die verwendeten Halbleiterspeicher werden hinsichtlich ihrer Funktionen unterteilt in

— Nur-Lese-Speicher (ROM, read-only memory)
  ROM-Schaltkreise beinhalten die festen Programmteile des Mikroprozessorsystems (Programm des Mikroprozessorsystems, Konstanten)
— Schreib-Lese-Speicher (RAM, random access memory).

Schaltungstechnische Realisierungsmöglichkeiten für ROM's sind:

— Diodenmatrix
— maskenprogrammierte ROM's
— programmierbare ROM's

Da maskenprogrammierte ROM's auf einen bestimmten Anwendungsfall zugeschnittene Schaltkreise sind, können notwendige (evtl. geringfügige) Programmänderungen nur mit Hilfe von komplizierten Änderungen der Masken durchgeführt werden. Die Bedingungen für den Einsatz von maskenprogrammierten ROM's sind daher:

— keine Programmänderungen
— Stückzahlen $> 10^3$ Schaltkreise je Programm (z. B. Klein- bzw. Kleistrechnerprogramme, Programme für NC-Maschinen)

Die aufgeführten Nachteile werden von den programmierbaren ROM's (PROM, programmable read only memory) vermieden. Bei ihnen erfolgt die Programmierung einzeln für jedes bit dadurch, daß interne Verbindungsstellen der Speicherzellen unterbrochen werden, und zwar durch UV-Bestrahlung.
Hierzu gibt es als Weiterentwicklung ein ROM, das sowohl programmierbar als auch löschbar und neu programmierbar ist. Dieser Schaltkreis wird REPROM oder häufig auch nur PROM genannt und wurde erst möglich durch die FAMOS-Speicherzelle (floating gate avalanche-injection MOS). Die FAMOS-Speicherzelle wird unter der Bezeichnung EPROM (erasable programmable read-only memory) geführt und wird elektrisch durch Spannungen von —30 ... —50 V programmiert. Das Löschen erfolgt auf der Basis einer UV-Bestrahlung der FAMOS-Speicherzelle. Die elektrische Programmierung und Löschung von EPROM-Schaltkreisen ist technisch und technologisch für eine breite Anwendung noch nicht ausreichend entwickelt.
Einen Überblick über Daten des statischen maskenprogrammierten Schaltkreises U 501 D gibt Tafel 6.

Tafel 6. Ausgewählte Kenngrößen des U501D [7]

Kenngröße	Wert	Bemerkung
Speicherkapazität	2048 bit (2 kbit)	
Wortlänge	8 bit	
Zugriffszeit	1 µs	für getakteten Betrieb
Bereitstellzeit	1 µs	für getakteten Betrieb
Haltezeit	5 µs	für getakteten Betrieb
Ausgangslast	1 TTL-Schaltkreis	
Betriebsspannung	—20 ... 0,3 V	
Stromaufnahme	40 mA	

Tafel 7. Ausgewählte Kenngrößen des U253 und des CM8001 [7]

Kenngröße	U253	CM8001	Bemerkung
Speicherkapazität	1024 bit	256 bit	
Leistungsverbrauch		1,5 mW/bit 0,12 mW/bit (1 W	Betriebsverlustleist. Ruheverlustleistung Gesamtverlustleist.)
Zugriffszeit	205 ns	1,5 µs	
Ausgangsverzögerungszeit	185 ns	1,1 µs	
Auffrischperiode	2 ms	—	
Zyklusdauer für nur Lesen	480 ns	1,5 µs	
Zyklusdauer für Lesen/Schreiben oder nur Schreiben	580 ns	0,9 µs *)	*) nur Schreiben
Betriebsspannung	—25 ... 0,3 V	—20 ... 0,3 V	
mittlere Stromaufnahme	25 mA		
Technologie	PMOS	PMOS	

RAM-Schaltkreise beinhalten variable Programmteile und dienen zum Zwischenspeichern von Daten. Sie bestehen in der Regel aus Flip-Flops oder 3-Transistor-Speicherzellen und können als dynamische oder statistische Speicher konzipiert sein. Als Halbleitertechnologien werden TTL, ECL, PMOS, NMOS, CMOS verwendet. Die Informationsspeicherung bei dynamischen Speichern erfolgt auf Kondensatoren, wobei der Ladungszustand der Kondensatoren immer wieder aufgefrischt werden muß. Hierzu können Signale, die aus dem Mikroprozessor kommen, verwendet werden. Stehen derartige Signale nicht zur Verfügung, müssen sie durch eine umfangreiche Steuerelektronik erzeugt werden. Die Auffrischung des Speicherinhaltes wird als Refreshing bezeichnet und erfolgt etwa alle 2 ms. Beim Ausfall der Betriebsspannung wird die Information der Speicherzellen, bedingt durch das Fehlen von Auffrischungssignalen, langsam gelöscht. Wird eine Information aus einer Speicherzelle gelesen, ist ein Wiedereinschreiben in der Refreshingphase notwendig, das einen Einfluß auf die Zugriffszeit hat.
Die statischen Speicher verwenden als Speicherzellen Flip-Flops. Hier entfällt die Auffrischungsphase. Statische Speicher haben den Nachteil, daß der Speicherinhalt beim Ausfall der Betriebsspannung sofort verloren geht.
In Tafel 7 sind typische Kennwerte für das dynamische RAM U 253 D und das statische RAM CM 8001 angegeben.
Aus Tafel 7 ist zu sehen, daß dynamische MOS-Schaltkreise weniger Leistung benötigen und aufgrund der damit kürzer werdenden Umsteuerphasen der Speicherzellen auch schneller arbeiten. Vergleichbar mit dem geringen Leistungsverbrauch dynamischer MOS-Speicher sind noch statische CMOS-RAM's.
Auf dem Gebiet der Speichertechnik wird es das Entwicklungsproblem der Zukunft sein, Schaltkreise zu entwickeln, die einen geringen Leistungsverbrauch und eine kurze Zugriffszeit haben, kein Refreshing benötigen und trotzdem den Speicherinhalt über eine gewisse Zeit aufrecht erhalten.
Die in Mikroprozessoren eingesetzten Speicher (z. B. Register) können sowohl statische als auch dynamische Speicher sein.

msr 7317 (wird fortgesetzt)

Klassifizierung von BMSR-Aufgaben

Von der TH „Carl Schorlemmer" Leuna-Merseburg, Arbeitsbereich Automatisierungstechnik, Leitung Prof. Dr. sc. techn. *Brack*, wurde eine Klassifizierung der BMSR-Aufgaben vorgeschlagen, die sich weithin durchgesetzt hat. Diese Klassifizierung ist an automatisierten kontinuierlichen Fließgutprozessen orientiert.

Der Fachausschuß 10, „Projektierung", der WGMA hat die Begriffe unter dem Aspekt der inzwischen eingesetzten Entwicklung und der Berücksichtigung von Binärsteuerungen und wenig automatisierten Prozessen noch einmal diskutiert und schlägt die nachfolgende Charakterisierung der Begriffe für typische Automatisierungsaufgaben vor (Tafel):

Die Einteilung erfolgt nach funktionellen Gesichtspunkten. Die Verflechtung der Aufgaben innerhalb einer hierarchischen Automatisierungsstruktur wird nicht mit dargestellt.

In jeder Ebene einer hierarchischen Struktur können alle Komponenten enthalten sein. Üblicherweise dominieren die BMSR-Funktionen bis einschließlich Prozeßstabilisierung in der Basisautomatisierung, die Funktionen Prozeßführung und -optimierung dagegen in den übergeordneten Steuerebenen.

BMSR-Funktion	zu lösende Aufgaben	wesentliche Eingangsinformationen	typische Lösungskomponenten
Prozeßbedienung	manuelle Führung, Stabilisierung, Optimierung und Sicherung von Prozessen	Istwerte von Prozeßgrößen	Fernmessung, Fernverstellung
Prozeßüberwachung	Beaufsichtigen eines automatisierten Prozesses; teilweise Handbedienung zur Übernahme von Funktionen, die zeitweise nicht von der Automatik ausgeführt werden	Abstand von Grenzwerten, Informationen über Funktionsfähigkeit von Geräten und Anlagen	Hand-Automatik-Umschaltung; Befehlsgeräte; Signalanlagen
Prozeßsicherung	Alarm, Notabschaltung zum Vermeiden gefährlicher Anlagenzustände; Verwirklichen optimaler Abwehrstrategien gegen nicht ausregelbare Störungen; Verhinderung von Fehlbedienung (Verriegelung)	Abstand von Grenzwerten	Befehlsgeräte; Abfahrprogramme
Prozeßstabilisierung	automatische Kompensation der Auswirkung von Störgrößen (Einhalten vorgegebener Arbeitspunkte); Erzielen vorgegebener Prozeßverläufe; dynamische Entkopplung von Teilprozessen	Führungsgrößen, Führungsgrößenverläufe; Regelabweichungen; meßbare Störgrößen	Regelungen; stetige Steuerungen; (Binärsteuerungen)
Prozeßführung	Wahl und Herbeiführung des Betriebsregimes und der Arbeitspunkte; Realisierung von Betriebsabläufen	Leistungsvorgaben, -reserven; Anlagenzustand; Zeitpläne, Schaltfolgen	Einrichtungen zur Informationsverdichtung; Binärsteuerungen
Prozeßoptimierung	Automatische Bestimmung optimaler Sollwertkonfigurationen oder dynamischer Prozeßverläufe	Prozeßgrößen, Zielgrößen, Modelle; Handlungsspielraum; meßbare Störungen	Rechner
Prozeßbilanzierung	ökonomische Abrechnung, Fehleranalyse, Auswertung des Betriebsgeschehens	Prozeßgrößen; Schaltzustände; integrierte oder summierte Meßgrößen	Registriereinrichtungen; Informationsspeicher; Rechner

msr 7469 *R. Müller; M. Strüver*

Neuerscheinung vom VEB Verlag Technik: VEM Handbuch „Zuverlässigkeit von Automatisierungs- und Elektroenergieanlagen"

In diesem neuesten Titel aus der bekannten VEM-Handbuch-Reihe werden wesentliche Erkenntnisse auf dem Gebiet der Zuverlässigkeit bei praktischen Aufgabenstellungen für Automatisierungs- und Elektroenergieanlagen dargelegt. Die Autoren des VEM-Handbuchs, redaktionelle Leitung Dipl.-Ing. J. *Nikolaizik*, Institut für Elektro-Anlagen, Berlin, sind Wissenschaftler und praktisch tätige Ingenieure, die durch langjährige Arbeit auf dem Gebiet der Zuverlässigkeit von Automatisierungs- und Elektroenergieanlagen über große Erfahrungen verfügen, die sie Projektanten, Technologen und Betriebsingenieuren zur Verfügung stellen.

Gegenüber bisher bekannten Publikationen zur Zuverlässigkeit, die sich vor allem auf zuverlässigkeitstheoretische Probleme und auf elektronische Bauelemente und Einrichtungen beziehen, zeichnet sich dieses Handbuch dadurch aus, daß

- praxisorientierte Probleme zur Zuverlässigkeit bei Automatisierungs- und Elektroenergieanlagen dargestellt werden
- der enge Zusammenhang zwischen Zuverlässigkeit und Ökonomie aufgezeigt wird sowie Variantenvergleiche und Optimierungsrechnungen durchgeführt werden
- Grundgedanken der Schadensbekämpfungstheorie dargestellt werden
- die Lösungsmethoden in einer für den Techniker leicht verständlichen Form aufbereitet sind
- einige Ergebnisse mit der UdSSR abgestimmt sind; dies betrifft vor allem die Darlegungen zur Methode der homogenen Markov-Prozesse (Abschn. 6.) und zur Fehlerbaummethode (Abschn. 7.)
- durchgängig die Terminologie zugrunde gelegt wurde, die in Standards und Vorschriften der DDR festgelegt ist
- die Problematik anhand von zahlreichen praktischen Beispielen eingehend erläutert wird.

Die Thematik wurde so aufbereitet, daß keine umfangreiche Einarbeitung in die theoretischen Zusammenhänge, die dann individuell auf die praktischen Belange zugeschnitten werden müßten, erforderlich ist.

Damit steht ein Nachschlagewerk zur Verfügung, das sowohl den Fachingenieuren für Zuverlässigkeit als auch den in der Forschung/Entwicklung, Projektierung, Konstruktion und Fertigung tätigen Ingenieuren des behandelten Fachgebiets ein gutes Hilfsmittel sein wird, um die in Standards und anderen Vorschriften enthaltenen Forderungen an die Zuverlässigkeit zu erfüllen. Darüber hinaus können auch Studenten der Hoch- und Fachschulen praktische Hinweise für die Lösung ihrer Aufgaben entnehmen.

5. Konferenz „Magnetische Signalspeicher"

Die Speicherung von Informationen ist ein zentrales Gebiet in Natur und Technik. Hätte die Natur nicht die genetische Speicherung von Informationen erfunden, gäbe es kein Leben, ohne die Speicherung von Information im Gehirn gäbe es kaum zweckmäßiges Verhalten. Erst der Mensch schuf sich technische Speicher, um sein mühevoll erworbenes Wissen für immer exakt aufbewahren zu können. Heute existieren insbesondere drei Gruppen von technischen Speichern. Das sind zum einen die klassischen Speicher, wie Schrift, Druck, Bild, Fotographie usw. Ihnen stehen schwerpunktmäßig die elektrischen Speicher gegenüber, die vor allem von zwei Gruppen bestimmt sind: Halbleiterspeicher und Speicher, deren Prinzipien mit dem Magnetband zusammenhängen. Auf der letzten wichtigen Gruppe, magnetomotorische bzw. Signalspeicher genannt, lag der Schwerpunkt der 5. Konferenz der sozialistischen Länder, die diesmal in Erfurt vom 4. bis 8. Mai 1981 stattfand. Diese Gruppe ist deshalb so wichtig, weil praktisch kein Rechner, auch kein Mikrorechner, mehr ohne magnetomotorische Speicher in Form von Magnetbändern, Magnetplatten oder Floppydiscs (Folienspeicher) richtig arbeitsfähig ist. Selbst bei Taschenrechnern haben Magnetkarten beachtliche Bedeutung erlangt. Ohne Magnetbandgeräte sich auch Rundfunk und Fernsehen nicht mehr vorstellbar. Selbst Aufnahmen für die Schallplatte werden primär auf Magnetband aufgezeichnet. Auch die Raumforschung und Meßtechnik kommt ohne Magnetbandgeräte nicht aus. Beträchtlich ist überdies der Anteil, den die Magnetbandgeräte insbesondere in Form der Kassettengeräte im Konsumgütersektor einnehmen. Das jährliche Produktionsvolumen allein an Magnetbändern (ohne Gerätetechnik) beträgt z. Z. in der Welt über eine Milliarde Dollar.

Die diesjährige Konferenz wurde zum zweiten Male (nach 1978 in Dresden) von der DDR durchgeführt. Verantwortlich zeichneten das Zentralinstitut für Kybernetik und Informationsprozesse (ZKI) der Akademie der Wissenschaften der DDR und der VEB Magnetbandtechnik Dessau (MBF). Die wissenschaftliche Leitung lag bei Prof. Dr. H. *Völz*, ZKI. Dem wissenschaftlichen Komitee gehören an: Dr. *T. Fidecki*, VR Polen; Prof. *M. Gitlitz*, UdSSR; Prof. *K. Stopperka*, DDR (MBF); Dr. *J. Struska*, ČSSR; Doz. *O. Tzarnoretschki*, VR Bulgarien; Dipl.-Phys. *Z. Vajda*, Ungarische VR. An der Konferenz nahmen etwa 170 Vertreter aus der DDR, UdSSR, ČSSR, VR Bulgarien, VR Polen und der Ungarischen VR teil. In 8 Sektionen wurden 60 Vorträge gemäß folgender Verteilung gehalten DDR: 22, ČSSR: 12, Bulgarien: 11, Polen: 11, UdSSR: 3, Ungarn: 1.

10 Vorträge widmeten sich der Herstellung und den Eigenschaften von Magnetbändern. Dabei nahmen die magnetischen Partikel im Band (z. B. ihre Sichtbarmachung mit Elektronenmikroskopie), ihre Verteilung, die verschiedenen Basismaterialien für sie und die Messung der Eigenschaften von Bändern Schwerpunkte ein. Neben den bekannten ORWO-Produkten der DDR standen Bänder der VR Polen (darunter auch Meß- und Bezugsbänder) und die Untersuchungen des Prager Forschungsinstitutes VUZORT im Vordergrund. In der Gerätetechnik hatten sich die polnischen Vertreter bemüht, die Entwicklung ihrer vielfältigen Gerätelinien zur Schall- und Fernsehaufzeichnung deutlich zu machen. Die bulgarische Seite trat vor allem mit ihren Entwicklungen zu den Plattenspeichern und zum Floppydisc in 7 Vorträgen hervor. Bei den Magnetköpfen wurden neue Technologien vorgestellt, Materialfragen diskutiert und die wichtigen Meßmethoden erörtert. Auch ein flußempfindlicher Magnetkopf wurde wieder vorgestellt. Auf der Basis des von der DDR erstmalig in der Welt eingesetzten Metallschichtbandes (Interkosmossatelliten ab 1976) wurde das Prinzip des Endloswickels in verbesserter Form für universelle Einsätze demonstriert. Die Gerätetechnik (einschließlich der Meßgeräte) nahm mit 12 Vorträgen einen breiten Raum ein. Dabei wurde deutlich, wie die Automatisierung immer stärker in die Meß- und Prüftechnik einbezogen wird und auch hier der Mikrorechner bereits zum Stand der Technik gehört. Der Trend der hochdichten Speicherung war ebenfalls nicht zu übersehen. Er spiegelt sich u. a. bei den Methoden zur Spurfindung und Synchronisation sowie bei verschiedenen theoretischen Arbeiten wider. Hier hatten Vorträge des ZKI und der UdSSR das höchste wissenschaftliche Niveau. Sie betrafen u. a. die Modellierung des Band-Kopf-Kanals, die Magnetisierung im Band, Grundlagen zu den Störstellen, Informationstheorie des Kanals und Modellierung des Endloswickels.

Als Randgebiete der Tagung sind Vorträge zu assoziativen Speichern, zur Langzeitarchivierung, zu Halbleiterspeichern und auch zu genetischen und neuronalen Speichern zu betrachten.

Allgemein sehr wertvoll wurden die Rundtischgespräche zu Entwicklungstendenzen bei Aufzeichnungsmaterialien eingeschätzt. Sie wurden durch zwei Vorträge aus dem ZKI eröffnet und auch durch andere Vortäge der Tagung lag Diskussionsmaterial hierzu bereit.

Allgemein üblich ist heute die Aufzeichnung auf Magnetbandmaterialien mit γ-Fe_2O_3. Hinzugekommen sind seit einigen Jahren das CrO_2-Band und danach das Metallpartikelband. Diese Bänder gehen von magnetischen Partikeln aus, die in einem Bindemittel auf der Unterlage, eine Polyesterfolie, aufgebracht werden. Seit zwei Jahren wird nun auch in Japan das oben erwähnte Metallschichtband kommerziell eingesetzt. Hierbei wird eine extrem dünne ($< 1\ \mu m$) Kobaltschicht auf die Polyesterfolie aufgedampft. Mit den neuen Medien konnten ständig höhere Speicherdichten realisiert werden. Nun wird eine vollkommen neue Technik, die Senkrechtaufzeichnung, diskutiert. Hierbei liegen die Magnetisierungsstrukturen nicht in Längsrichtung des Bandes, sondern in Richtung der geringsten Ausdehnung des Bandes, also senkrecht zur Bewegungsrichtung und zur Breite des Bandes. Hiermit könnten eventuell noch höhere Speicherdichten technisch realisiert werden. Die mit diesem Trend zusammenhängenden Fragen wurden in vielfältiger und engagierter Weise über etwa 3 h von den Teilnehmern diskutiert. Das dabei und aus anderen Vorträgen gewonnene Wissen betrifft vor allem die Perspektive der Magnetbandspeicherung und kann hier nur in knapper Form wiedergegeben werden. Dabei sei auch auf die Abschlußeinschätzung des wissenschaftlichen Komitees zurückgegriffen.

Die Magnetbandspeicherung betrifft vor allem zwei Gebiete

- die Speicherung analoger Signale, wie Schall und Bild
- die Speicherung digitaler Signale, insbesondere Daten und Programme der Rechentechnik.

Auf dem ersten Gebiet ist keine Konkurrenz für die Magnetbandspeicherung bis zum Jahr 2000 abzusehen. Schall- und Bildplatte ergänzen das Magnetbandverfahren dann, wenn fertige Programme billig vervielfältigt werden sollen. Die Primäraufnahmen erfolgen aber auch hier per Band. Ein Trend zur digitalen Aufzeichnung dieser Signale führt hier zu keiner veränderten Situation.

Bei der digitalen Speicherung von Daten und Programmen werden die Hauptanwendungen bis zur Jahrtausendwende von den Halbleiterspeichern und den verschiedenen magnetomotorischen Prinzipien getragen werden. Beide Prinzipien ergänzen sich dabei mit ihren typischen Eigenschaften fast ideal. Die Vielfalt der technischen Lösungen auf dem Gebiet der magnetomotorischen Speicherung wird dabei weiter zunehmen. Diese Flexibilität ist nur ein Aspekt für ihren langfristigen Einsatz.

Bei den Medien für die Magnetbandspeicherung wird das altbewährte γ-Fe_2O_3

noch lange den Hauptanteil ausmachen. Die neuen Medien, insbesondere das Metallschichtband und die Bänder mit Senkrechtaufzeichnung, werden nur schrittweise und zögernd eine breitere Anwendung finden. Für verschiedene Spezialgebiete der hochdichten Speicherung werden sie jedoch schnell immer dringender notwendig.
Neben den magnetomotorischen Speichern und den Halbleiterspeichern erlangen für Sonderanwendungen die Bubble-Speicher gewisse Bedeutung. Ihr Einsatzgebiet liegt etwa zwischen den Halbleiter- und magnetomotorischen Speichern, und sie dürften zunächst bei Mikrorechnern Anwendung finden.
Weiter ist auf lange Sicht mit den Tieftemperaturspeichern zu rechnen. Ihr Einsatzgebiet kann jedoch nur die Halbleiterspeicher bei extrem kurzen Zugriffszeiten betreffen.
Das wissenschaftliche Komitee beschloß, die Konferenz jetzt periodisch alle 3 Jahre durchzuführen. Hinsichtlich des durchführenden Landes für die Tagung 1984 wird demnächst die Entscheidung fallen. msr 7476 *H. Völz*

Einsatz des speicherprogrammierbaren Steuerungssystems PS 2000

Auf einem ganztägigen Kolloquium der Sektion Automatisierungsanlagen der TH Leipzig (9. Juni 1981) wurden in fünf Vorträgen die Probleme dargelegt, die mit der Vorbereitung des Einsatzes, mit der Programmierung und dem Betrieb speicherprogrammierbarer Steuerungen verbunden sind.
Die zwei Referenten der TH Leipzig (*J. Alder*, *N. Trautwein*) zeigten, daß bei einer systematischen Prozeßzerlegung und klare Aufgabennotierung als Graph speicherprogrammierbare (oft als freiprogrammierbare bezeichnet) Steuerungen rationell programmiert werden können. Zur weiteren Vereinfachung dieser Programmierung kann die Dialogprojektierung unter Verwendung von Programmodulen, die den technischen Möglichkeiten eines preisgünstigen Mikrorechners und der Bildschirmgröße angepaßt sind, dienen (Vortrag *Th. Köhler*, VEB GRW Teltow, BT Leipzig).
Die positiven Einsatzerfahrungen bei Nutzung des Systems „PS 2000" wurden sehr ausführlich von *F. Köckritz*, VEB Chemieanlagenbaukombinat Leipzig/Grimma, Stammbetrieb Grimma, und *W. Achilles*, VEB Mikrosa, Leipzig, dargelegt.
In der ausführlichen Diskussion aller Vorträge, an der 43 Vertreter von 14 Betrieben, der TH „Otto von Guericke" Magdeburg und der TH Leipzig teilnahmen, wurden speziell Probleme, die sich aus dem Einsatz speicherprogrammierbarer Steuerungssysteme und speziell des „PS 2000" ergeben, beraten. Abhängig von der Problemstellung beim jeweiligen Einsatzfall und dem betrachteten alternativen Gerätesystem werden die Fragen der Kosten und der Einarbeitung in die neue Projektierungsweise für eine gesamte Binärsteuerung (einschließlich der umfangreichen Zusatzeinrichtungen für die Aufbereitung der Eingangssignale und die Leistungsanpassung der Ausgangssignale) unterschiedlich gewertet. Positiv hervorgehoben wurde, daß viele elektrische Stellantriebe (Magnetventile, Schütze bis zum ID 63) mit den Ausgangsbaugruppen direkt angesteuert werden können. Das System „PS 2000" schuf die Anwenderbasis für bald verfügbare neue Systeme speicherprogrammierbarer Steuerungen, die sicherlich die Anwenderbreite dieser Steuerungen wesentlich erweitern werden. msr 7482 *H. Wolf*

msr DISSERTATION

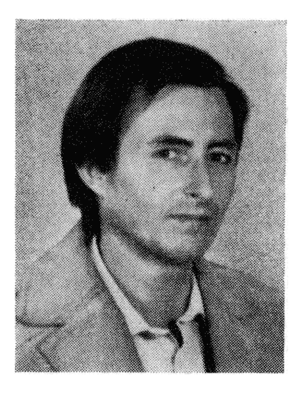
Entwicklung und Erprobung einer Meßeinrichtung zur kotinuierlichen Messung von dynamischen Flächenmasseänderungen bei Druckprozessen

Im Zusammenhang mit der experimentellen Prozeßanalyse an polygrafischen Maschinen besteht die Notwendigkeit, spezielle Prozeßparameter zu messen. Eine wichtige Aufgabe ist die kontinuierliche Messung von Flächenmasseänderungen bei dynamischen Vorgängen in Druckmaschinen.

Ausgehend von einer theoretischen Analyse der Anwendung des Beta-Rückstreuprinzips unter den spezifischen Bedingungen des Druckprozesses wurden die Besonderheiten und Grenzen der Anwendung niederenergetischer Beta-Isotope ausführlich untersucht.

Die Forderungen nach einer hohen Empfindlichkeit (Nachweis von Flächenmasseänderungen kleiner als 0,5 g/m^2) bei kurzen Meßzeiten bedingten die Entwicklung einer speziellen Meßeinrichtung.

Aufgrund der erzielten Grenzfrequenz $>$ 10 MHz können Impulsdichten verarbeitet werden, die Elementarmeßzeiten von einigen Millisekunden (einstellbar von 0,001 (0,001) bis 0,999 s) zulassen. Die Entwicklung einer speziellen Strahlenquelle in Verbindung mit dem Einsatz eines Halbleiterdetektors war eine wesentliche Voraussetzung zur Erfüllung der gestellten Forderungen.
Die Meßeinrichtung ist so aufgebaut, daß verschiedene Meßtechnologien den jeweiligen Prozeßbedingungen angepaßt werden können. Damit kann ein universeller Einsatz für ähnliche Meßaufgaben erfolgen. Besonderer Wert wurde auf die Möglichkeit der direkten Weiterverarbeitung der Meßsignale mit Hilfe von Recheneinrichtungen (Mikrorechner — Minivariante) gelegt. Durch entsprechende Software (z. B. aktueller Mittelwert, Varianz u. ä.) erhält man eine Systemlösung mit großer Variabilität. Die Erprobung an verschiedenen praktischen Prozessen brachte die erwarteten Ergebnisse.



R. Vetter (43) arbeitete nach einer Ingenieurausbildung in Mittweida (Strahlenmeßtechnik) von 1961 bis 1970 im VEB Kombinat „Otto Grotewohl" Böhlen. Während dieser Zeit absolvierte er ein Fernstudium an der TH Ilmenau (Theoretische Elektrotechnik/Informationstechnik). Ab 1970 war er zunächst als Fachschullehrer, dann als Lehrer im Hochschuldienst an der TH Leipzig (Sektion Technische Kybernetik) tätig. Gegenwärtig ist er Oberassistent im Wissenschaftsbereich Automatisierungstechnik.

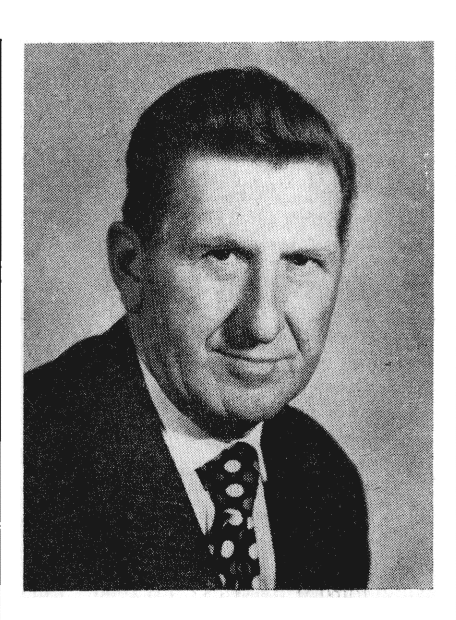
Dissertation A an der Technischen Hochschule Leipzig, Sektion Automatisierungsanlagen; Leipzig, 29. November 1980.

Doktorand: Dipl.-Ing. *R. Vetter*
Gutachter: Prof. Dr. sc. techn. *W. Richter*
Prof. Dr. sc. techn. *A. Löffler*
Dr.-Ing. *W. Tietze*

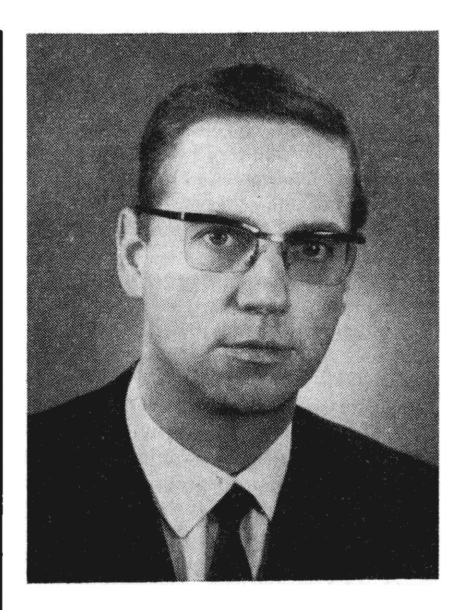
Die Dissertation kann nur über die Bibliothek der TH Leipzig entliehen werden.

msr 7511 Dr.-Ing. *R. Vetter*, TH Leipzig, Sektion Automatisierungsanlagen, WB Automatisierungstechnik, 7030 Leipzig, Karl-Liebknecht-Str. 132

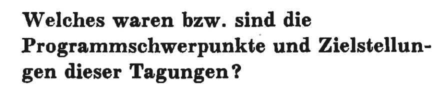
Im Zusammenhang mit dem vom 1. bis 5. September 1980 in Berlin stattgefundenen Internationalen Symposium „Systems Analysis and Simulation" (s. msr **24** (1981) H. 2, S. 110 ff.) und der vom 8. bis 10. Dezember 1981 in Rostock stattfindenden 10. Jahrestagung „Grundlagen der Modellierung und Simulation" (einige Beiträge dieses Heftes sind dazu offizielles Tagungsmaterial) stellte die Redaktion an zwei prominente DDR-Fachleute auf diesem Gebiet: Prof. Dr. sc. techn. *K. Reinisch* (TH Ilmenau) und Prof. Dr. rer. nat. *A. Sydow* (AdW der DDR, ZKI), die beide Vorstandsmitgleider der WGMA (Mitveranstalter der beiden wissenschaftlichen Veranstaltungen) sind, einige Fragen:



Prof. Dr. sc. techn. K. Reinisch



Prof. Dr. rer. nat. A. Sydow



Welches waren bzw. sind die Programmschwerpunkte und Zielstellungen dieser Tagungen?

Prof. Sydow:

Das vorjährige Internationale Symposium hat zu einem breiten Programmspektrum wesentliche Beiträge gebracht. Einige Gebiete und Vorträge seien genannt:

- Mathematisch-kybernetische Modellbildung mit den Forschungsschwerpunkten
  - Nichtlineare Systeme (*Raibman, Mehra*)
  - Systeme mit verteilten Parametern (*Vichnevetsky*)
  - Hierarchische Systeme (*Findeisen*)
  - Optimierung und Polyoptimierung (*Peschel, Troch*)
  - Zeitdiskrete Modellierung kontinuierlicher Systeme (*Greenspan*).
- Methodologie der Simulation einschließlich Anwendungen mit den Beiträgen
  - Robustheit und Simulationssoftware (*Cellier*)
  - Neue Entwicklungsrichtungen der Simulationssoftware (Einschluß von Methoden der „künstlichen Intelligenz") (*Ören*)
  - Theoretische Modellbildung und Simulation von industriellen Prozessen (*Fasol*)
  - Simulation von Umweltsystemen (*Vansteenkiste*)
  - Modellierung und Steuerung von Wasserressourcensystemen (*Reinisch*)
  - Modellierung biologischer Systeme (*Koch*)
  - Modellierung und Simulation von Verkehrssystemen (*Strobel*)
  - Modellierung und Simulation komplexer Systeme (Wassersysteme, Verkehrssysteme, Ökosysteme, Verfahrenstechniken zur Modellumformung) (*Sydow*).

Es wurden insgesamt 18 Übersichtsvorträge und 150 Vorträge gehalten.

315 Teilnehmer aus 24 Ländern nahmen an diesem vom Zentralinstitut für Kybernetik und Informationsprozesse der AdW der DDR unter Mitwirkung von IFAC, IMACS und WGMA organisierten Internationalen Symposium teil.

Im Unterschied zu dieser im Jahre 1980 wohl umfassendsten einschlägigen Veranstaltung zum Gebiet der Systemanalyse und Simulation kann unsere 10. Jahrestagung in Rostock nur einige dieser Schwerpunkte beleuchten. Vorgesehen sind Sektionen für die Anwendungsgebiete

- Modellierung in der Ökonomie
- Modellierung in der Ökologie
- Modellierung technischer Systeme.

Daneben bestimmen die traditionellen Sektionen zur analogen, hybriden, digitalen und kombinierten Simulation sowie eine methodologische Sektion zur Modellierung komplexer Systeme den Charakter dieser Tagung. Ohne Zweifel hat sich diese Tagung einen festen Platz im RGW-Tagungskalender erworben. Dies ist sichtbar an dem wachsenden Teilnehmerzustrom (1980: 270) und an den regen Diskussionen in den Sektionen. Als Gründe für diese Entwicklung muß man die Zusammengehörigkeit und gegenseitige Anpassung von Methoden der Systemanalyse und mathematisch-kybernetischer Modellierung und Computersimulation betrachten. Eine abgestimmte Verfahrenstechnik bei der Wahl der Modelle und der anschließenden Simulation sowie computergestützte Methoden der Parameteranpassung und Optimierung, der Modell-Aggregation und -Dekomposition und der Auswahl von Steuerungen bilden eine einheitliche „Technologie" der Systemanalyse, Modellierung und Simulation. Unsere Rostocker Tagung rückt dieses Entwicklungsziel immer mehr in den Vordergrund.

Welche Bedeutung haben mathematisch-kybernetische Modelle für die Ableitung von Steuerungsstrategien im Bereich nichtindustrieller Systeme?

Prof. Reinisch:

Jede Ermittlung einer günstigen Steuerungsstrategie setzt explizit oder implizit die Bildung eines Modells voraus, das die Beziehungen zwischen den steuerbaren Eingangsgrößen und den für den vorliegenden Anwendungszweck maßgebenden (Ausgangs-)Größen beschreibt. Während in der Vergangenheit der Umfang vieler Probleme so beschränkt war, daß diese Zusammenhänge vom Menschen ohne explizite Modellbildung über-

sehen werden konnten, bilden sich durch rasch zunehmende Verflechtungen in nahezu allen Bereichen der Volkswirtschaft (und darüber hinaus der Gesellschaft) immer größere, komplizierte Prozesse bzw. werden aus ökonomischen Gründen immer umfangreichere Prozesse geschaffen. Wesentliche Ursachen für diese sich verstärkenden Verkopplungen sind die zunehmenden Verknappungen von Rohstoffen und Energieträgern, die Beschränkungen des Arbeitskräftepotentials und der finanziellen Fonds sowie die durch die enorm gewachsene industrielle und landwirtschaftliche Produktion gestiegenen Umweltbelastungen, die durch die Natur allein nicht mehr abgebaut werden können. Eine begründete Entscheidungsfindung ist bei derartig komplexen Zusammenhängen ohne eine angemessene Modellbildung kaum denkbar.

Die für die möglichst gute Erfüllung der Hauptaufgabe notwendige hohe Produktivität und Effektivität erfordern nicht nur die möglichst optimale Planung, Entwicklung und Steuerung der verschiedenen Teilprozesse (industrielle, landwirtschaftliche, energiewirtschaftliche, verkehrstechnische, kommunale u. a.), sondern auch deren optimale Koordinierung (optimale Ressourcenzuteilung u. a.) auf der Ebene der Betriebe, Städte, Territorien und der gesamten Volkswirtschaft und Gesellschaft. Bedenkt man, daß sich viele Einflüsse (insbesondere auf Bevölkerungsentwicklung und ökologische Gleichgewichte) sowie erforderliche Maßnahmen (insbesondere Entwicklung und Einsatz alternativer Technologien) erst nach (vielen) Jahren auswirken, so ist klar, daß dynamische Modelle zur Entscheidungsfindung benötigt werden. Der Optimierungshorizont für den Entwurf der Entwicklungs- und Steuerungsstrategien muß dabei genügend groß sein, um auch für die nachfolgenden Generationen gute Lebensbedingungen zu sichern.

Es ist offensichtlich, daß bei der Komplexität solcher Prozesse und wegen der (infolge der Vielzahl und Langzeitdauer der hervorgerufenen Änderungen) großen Tragweite vieler wichtiger Entscheidungen eine sorgfältige Modellbildung meist eine unabdingbare Forderung ist bzw. sein müßte.

Der bei Anwendung solcher Modelle zur Ableitung günstiger Planungs- und Steuerungsstrategien im nichtindustriellen Bereich erzielbare Nutzen betrifft insbesondere Einsparungen von Energie und anderen wichtigen Ressourcen, von Arbeitskräften und Materialien sowie von finanziellen Fonds und führt somit zu einer Effektivitätssteigerung. Das sind zentrale Forderungen von Partei und Regierung. Demgegenüber stehen ein erhöhter geistiger und rechentechnischer Aufwand bei der Ausarbeitung der Strategien und eine meist rechnergestützte Entscheidungsfindung bzw. Steuerungsberechnung in der Arbeitsphase, wofür in den allermeisten Fällen Mikrorechner ausreichen dürften. Das sind Aufwendungen, für die keine harten Beschränkungen bestehen und die außerdem zu einer den geistigen Fähigkeiten der Menschen angemessenen Tätigkeit führen. Auf dem Symposium wurde eine ganze Reihe von Beispielen vorgetragen, die das belegen.

Mit solchen Methoden konnten in dem von mir geleiteten Bereich einige wesentliche Ergebnisse erzielt werden:

- Das Defizit in der Wasserversorgung einer industriellen Großstadt der DDR aus 3 Talsperren konnte wesentlich gesenkt werden.
- Durch sehr genaue und rechtzeitige Hochwasservorhersagen für das Flußgebiet der Werra konnten alle notwendigen Maßnahmen getroffen und größere Schäden verhindert werden.
- Es wurden optimale Strategien für Investitions- und Arbeitskräfteeinsatz anhand globaler volkswirtschaftlicher Modelle ermittelt.
- Zur Zeit werden optimale Strategien zum Ausbau und zur Steuerung eines großen Fernwasserversorgungssystems und eines städtischen Energieversorgungssystems erarbeitet.
- Es werden Strategien zur Klimasteuerung in einem Gewächshaus ermittelt, die bei beschränktem Energieeinsatz einen maximalen Ertrag gewährleisten sollen.

Für die Erarbeitung solcher Strategien ist charakteristisch, daß — in jedem Fall auf der Grundlage der vorliegenden Modelle — sowohl strenge Lösungs- (Optimierungs-)Methoden der Optimalsteuerungstheorie und Kybernetik sowie Operationsforschung als auch die in der Systemanalyse übliche Entscheidungsvorbereitung durch interaktive Untersuchung von Entwurfs- bzw. Steuerungsvarianten am simulierten Modell unter Nutzung der schöpferischen Fähigkeiten des Menschen (Scenario-Methoden) zur Anwendung gelangen. Hinzu kommen noch die für den Aufbau hierarchischer Steuerungssysteme typischen Zerlegungs- und Koordinierungsmethoden. Auf diese Weise wird gegenwärtig eine Methodik zur Planung, Entwicklung und Steuerung großer Systeme entwickelt, die für Anwendungen in den hier betrachteten Bereichen eine außerordentliche Bedeutung hat.

Wie sehen Sie die Entwickung der Computersimulation und das Verhältnis von Systemanalyse und Simulation?

Prof. Sydow:

Im Bereich der festetablierten digitalen Simulation gibt es weiterhin die Bemühung, Simulationssprachen für Groß- und Kleinrechner zu standardisieren. Die digitale Simulation mit Kleinrechnern ist noch in voller Entwicklung. Hierzu kommen jetzt noch die Möglichkeiten der interaktiven Simulation, ermöglicht durch komfortable Peripheriegeräte.

Es ist offen, ob durch Mikrorechner eröffnete neue Möglichkeiten der parallelen Simulation breite Anwendung finden werden. Um zu hohen Verarbeitungsleistungen bei der Simulation großer komplexer Systeme zu kommen, wurden Vektorprozessoren mit neuen, auf hohen Datendurchsatz zugeschnittenen Architekturen entwickelt. Bei solchen Vektorprozessoren können folgende Klassen unterschieden werden:

- Großrechner mit einer Anzahl parallelisierter Pipeline-Rechenwerke für Spezialsimulationen, z. B. Wettervorhersagen
- Feldrechner (Array-Prozessoren) mit Parallelisierung der arithmetischen Verarbeitungseinheiten, der Speicher und der Datenwege
- Parallelrechnersysteme mit mehreren parallelen Einzelrechnern.

Die Technik paralleler Simulation wird neben den eben angeschnittenen Fragen der Rechnerarchitekturen ganz wesentlich von der softwaremäßigen Unterstützung und der Bereitstellung paralleler Algorithmen, insbesondere für effektive und für Parallelarbeit geeigneter Iterations- und Integrationsverfahren, abhängen. Trotz vieler noch offener Entwicklungsfragen bietet die parallele digitale Simulation neue Aspekte der Echtzeit- und Vorhersagesimulation.

Die Aufgaben der Analyse großer komplexer Systeme erfordern aber gerade schnelle Simulationstechniken. Das Verhältnis von Systemanalyse und Simulation wird durch folgende Gesichtspunkte bestimmt:

- Sie bilden Glieder einer Verfahrenskette (Systemanalyse — mathematisch-kybernetische Modellierung — Simulation).
- Die mathematisch-kybernetische Modellierung als Kettenglied zwischen ihnen ermöglicht Anpassung durch Festlegung und Standardisierung von Systemklassen.
- Der Modellierungsprozeß wird erst mit der Testung durch die Simulation abgeschlossen und ist zumeist ein iterativer Prozeß, so daß die angedeutete Verfahrenskette häufig durchlaufen wird. Das gleiche gilt auch für die Entscheidungsfindung und Festlegung von Steuerungen.

Auf den Tagungen wurden bzw. werden Arbeiten der von uns vertretenen Institutionen vorgestellt, die die Systemanalyse rechentechnisch unterstützen: Verfahrenstechniken zur Modellaggregation und -dekomposition mittels Rechnersimulation, Methoden zur Parameteranpassung und Optimierung in großen Räumen, Spezialsoftware für ökologische und ökonomische Systeme.

Herr Prof. *Reinisch*, Herr Prof. *Sydow*, die Redaktion dankt Ihnen für Ihre interessanten Ausführungen.

msr 7484

Baustein PR 111.3 zur elektronischen Steuerung von Förderern bzw. Förderbändern

Mit dem Baustein PR 111.3 ist ein universell einsetzbarer elektronischer Baustein zur Steuerung von Förderern bzw. Förderbändern entwickelt worden.

Der Baustein gewährleistet, daß der Durchlauf von Transportgütern über (vorzugsweise) Schräghöhenförderer stets den Betriebsbedingungen entsprechend gesteuert wird. Jeder mit diesem Baustein ausgestattete Förderer arbeitet selbständig, so daß die gesamte Prozeßsteuerung in Transportsystemen dezentralisiert, störungssicher, kostengünstig und wartungsfrei aufgebaut werden kann. Die jeweils notwendigen Steuerbefehle erhält der Baustein durch das Transportgut selbst, so daß der Förderer nur im Bedarfsfall läuft und sich eine Energieeinsparung bei Erhöhung der Standzeiten für Motor, Getriebe und andere mechanisch bewegte Teile ergibt.

Durch den Einsatz moderner Bauelemente der Mikroelektronik war es möglich, auf einer Leiterplatte (110 × × 160 m², Einbautiefe etwa 60 mm) folgende Funktionen zu vereinen:

- zwei getriggerte Eingänge mit einstellbarer Empfindlichkeit zur Anpassung an die Beleuchtungsverhältnisse sowie zur Entgegennahme der Steuerbefehle von Lichtschranken
- zwei von 1 ... 10 s einstellbare Zeitstufen, die die Laufzeit des Förderers bzw. die Abschaltverzögerung bestimmen
- Logiknetzwerk zur Verknüpfung und Auswertung der Steuersignale
- Leistungsschalter bis 0,5 kW zur Ansteuerung von Motorschützen
- Stromversorgung des Bausteins.

Die Steuerung der Förderer erfolgt durch die zu befördernden Güter unabhängig von Reihenfolge, Anzahl und Gewicht mit Hilfe fotoelektrischer Geber. Wegen der günstigen Montage, der hohen Empfindlichkeit und der breiten Spektralempfindlichkeit werden für die Geber in Meldelampenfassungen eingelötete Fotowiderstände verwendet. Das darüber hinweglaufende Transportgut dunkelt dieses ab (bei Schüttgütern seitliche Anordnung) und löst damit die Steuerbefehle aus: Der durch den Helligkeitsunterschied erreichte Spannungssprung wird im Baustein durch einen Trigger in einen Rechteckimpuls umgewandelt, durchläuft das Zeitglied und löst das Einschalten des Förderers aus. Nach der mit dem Zeitglied eingestellten Haltezeit wird der Förderer ausgeschaltet. Sämtliche nach außen führenden elektrischen Verbindungen sind klemmbar, so daß der Baustein ohne Schwierigkeiten angeschlossen werden kann.

Durch besondere Schaltungsmaßnahmen sind der Baustein und damit die zu den Gebern führenden Leitungen galvanisch vom Netz getrennt. Der Baustein arbeitet mit einer Versorgungsspannung von 220 V ~± 20% und ist bis +60 °C einsetzbar.

Besonderer Wert wurde bei der Schaltungsentwicklung auf die Langzeitkonstanz der Zeitbausteine gelegt.

Die Empfindlichkeit der beiden Eingänge und die Zeitglieder lassen sich mit Hilfe von Dickschichteinstellreglern mit einer Zehnerteilung einstellen.

Der Baustein wird in der Betriebsschule des VEB Instandsetzungswerkes Pinnow gefertigt und ist zum Preis von 257,— M lieferbar (Zeigerumfang: kompletter Baustein mit 2 fotoelektrischen Gebern).

msr 7346

Verfahren zur Druckregelung verstellbarer Pumpen und Druckregeleinrichtung hierzu

DDR-WP 136998, Klasse F 04 B, Gruppe 1/08, 8 Anspruchspunkte, 2 Zeichnungen. Anmeldung: 1. Juni 1978, Ausgabe: 8. August 1979. Inhaber: Dipl.-Ing. *Winfried Bautz*

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Druckregelung verstellbarer Pumpen und eine Druckregeleinrichtung, bestehend aus einem Druckregler zur Einstellung des Minimaldruckes und damit der Lage der Regelkennlinie und aus einer Stelleinheit zur Betätigung eines den Förderstrom beeinflussenden Hubstellkörpers in Druckabhängigkeit entsprechend der Regelkennlinie.

Ziel der Erfindung ist es, bei verstellbaren Pumpen mit Druckregeleinrichtungen die beim Anfahren auftretenden großen Leistungsspitzen der Elektromotoren und die daraus entstehenden Schwierigkeiten beim Einschalten von Elektromotoren großer Leistung sowie die maximale Belastung des Leistungssystems zu vermeiden.

Das erfindungsgemäße Verfahren sieht folgende Maßnahmen vor:

— die im Ruhezustand druckentlastete und die Pumpe auf Maximalförderstrom ausgestellte Stelleinheit wird mit Beginn des Druckaufbaues beiderseitig mindestens einem Steuerdruck ausgesetzt

— die Stelleinheit wird mittels des steigenden Steuerdruckes in Richtung Minimalförderstrom bis in eine vorbestimmte Stellung verstellt

— die Pumpe wird nach der Förderstromverminderung bis zu dem der vorbestimmten Stellung der Stelleinheit analogen Wert in dieser Stellung fixiert und baut ihren Förderdruck bis zu dem dem Förderstrom entsprechenden Druck der Regelkennlinie auf

— mit Erreichen der vorbestimmten Stellung der Stelleinheit übernimmt der Druckregler die Funktion des Druckaufbaues bis in die vorgegebene Regelkennlinie

— die Stelleinheit wird nach Erreichen des Regelkennliniendruckes entsprechend der vorgegebenen Regelkennlinie gesteuert und damit die fixierte Stellung der Pumpe aufgehoben.

Gemäß der Erfindung ist vorgesehen, daß die Verstellung der Stelleinheit zeitabhängig erfolgt. Eine Vereinfachung des Verfahrens kann erreicht werden, wenn für den die Stelleinheit steuernden Steuerdruck ausschließlich der Pumpenförderdruck abgelegt wird.

Die zur Erfindung gehörende Druckregeleinrichtung ist in der Patentschrift beschrieben und dargestellt.

msr 7285

Vorrichtung zur hydraulischen Druck- und Geschwindigkeitssteuerrung in Spritzgießmaschinen

DDR-WP 136811, Klasse B 29 F, Gruppe 1/06, 3 Anspruchspunkte, 1 Zeichnung. Anmeldung: 27. Juni 1978, Ausgabe: 1. August 1979. Inhaber: *Hannelore Neumann*, Dipl.-Ing. *Klaus Klimank*

Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zur hydraulischen Druck- und Geschwindigkeitssteuerung in Spritzgießmaschinen, bei der ein beiderseitig beaufschlagbarer hydraulischer Arbeitszylinder, der einen translatorisch und rotatorisch bewegbaren Spritzkolben aufnimmt, während der Arbeitsphase Vorlaufgeschwindigkeit und Nachdruck mit der Zuflußleitung eines hydraulischen Druckstromerzeugers und während der Arbeitsphase Staudruck mit einer Ablaufleitung verbunden ist.

Die Erfindung besteht darin, daß in an sich bekannter Weise zur Steuerung der Vorlaufgeschwindigkeit des Schnekkenkolbens in einer Zweigleitung *1* zu einer mit dem kolbenseitigen Zylinderraum *2* verbundenen Druckleitung *3* hintereinander ein fest eingestelltes Druckminderventil *4*, ein Drosselventil *5* und ein über elektrische Stellglieder einstellbares Druckbegrenzungsventil *6* angeordnet ist und zur Steuerung des Nach- und Staudruckes parallel zu dem Druckminderventil *4* und dem Drosselventil *5* in einer Umgehungsleitung *7* ein Wegeventil *8* eingebunden ist.

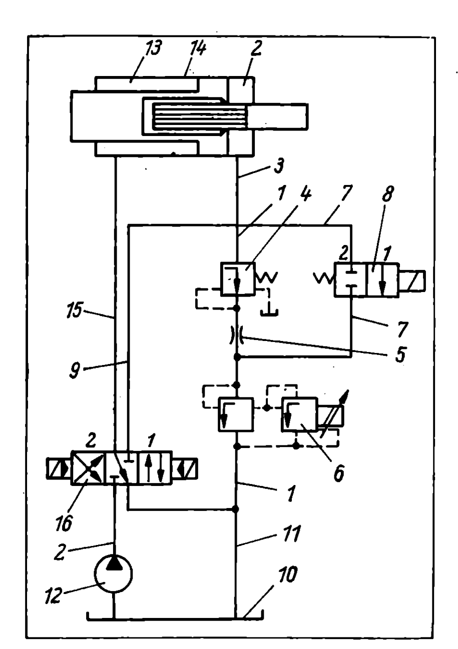
Das fest eingestellte Druckminderventil *4* steht zuflußseitig mit der zum kolbenseitigen Zylinderraum *2* führenden Druckleitung *3* in Verbindung, während abflußseitig das Drosselventil *5* nachgeordnet ist. Der Abfluß des Drosselventils *5* ist mit dem Zufluß des Druckbegrenzungsventils *6* verbunden, dessen Abfluß in die zum Behälter *10* führende Ablaufleitung *11* mündet. In die von dem Druckstromerzeuger *12* und in die vom Behälter *10* zu den kolbenseitigen bzw. kolbenstangenseitigen Zylinderraum *2*, *13* des hydraulischen Arbeitszylinders *14* führende Druck- bzw. Ablaufleitung *3*, *15* ist ein elektrisch schaltbares 5/3-Wegeventil *16* eingebunden.

Zur Steuerung der Vorlaufgeschwindigkeit des Schneckenkolbens befindet sich das Wegeventil *16* in der Schaltstellung 1. Ein oder mehrere Druckstromerzeuger *12* beaufschlagen über eine Druckleitung *15* den kolbenseitigen Zylinderraum *13*. Über die in die Zweigleitung *1* zur Druckleitung geschaltete Gerätegruppe, bestehend aus dem Druckminderventil *4*, der Konstantdrossel *5* und dem elektrisch stellbaren, vorgesteuerten Druckbegrenzungsventil *6*, kann Druckflüssigkeit zum Behälter *10* abdosiert werden. Die Höhe des zum Behälter *10* abdosierten Ölstromes wird dabei von der Einstellung des Druckbegrenzungsventils *6* bestimmt. Zur Steuerung des Nachdruckes befindet sich das Wegeventil *16* in der Schaltstellung *2*. Das parallel zu den Geräten Druckminderventil *4* und Drosselventil *5* in Umgehung dieser Geräte geschaltete Wegeventil *8* befindet sich in Schaltstellung 1. Damit wird die Funktion der Ölstromsteuerung aufgehoben. Der Ölstrom vom Druckstromerzeuger *12* wird direkt über die Leitung *9* auf das Druckbegrenzungsventil *8* geleitet. Damit wird ein gesteuerter Nachdruck realisierbar.

Zur Steuerung des Staudruckes befindet sich das Wegeventil *16* in der Schaltstellung 0. Während des Plastizierens wird der Spritzkolben aus seiner vorderen Endstellung nach seiner hinteren bewegt. Dabei verringert sich das Volumen des kolbenseitigen Zylinderraumes *13*. Das aus dem Zylinderraum *13* abfließende Druckmedium gelangt unter Umgehung des Druckminderventils *4* und des Drosselventils *5* über das Wegeventil *8* zu dem über elektrische Stellglieder einstellbaren Druckbegrenzungsventil *6* und anschließend zum Behälter.

msr 7288

1 Zweigleitung; *2*, *13* Zylinderräume; *3* Druckleitung; *4* Druckminderventil; *5* Drosselventil; *6* Druckbegrenzungsventil; *7* Umgehungsleitung; *8*, *16* Wegeventil; *9* Leitung; *10* Behälter; *11*, *15* Ablaufleitungen; *12* Druckstromerzeuger; *14* Arbeitszylinder



Verfahren zur geregelten Einstellung physikalischer Größen

DDR-WP 140391, Klasse G 05 B, Gruppe 11/00, 4 Anspruchspunkte, 4 Zeichnungen. Anmeldung: 30. November 1978, Ausgabe: 27. Februar 1980. Inhaber: *Rolf Rüger*, Dipl.-Ing. *Hans-Georg Schmidt*, Dr.-Ing. *Wolfgang Seide*

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur schnellen, hochgenauen, geregelten Einstellung physikalischer Größen, insbesondere bei sich ständig wiederholenden Einstellvorgängen.

Die Erfindung ist beispielsweise anwendbar bei Positioniervorgängen mechanischer Objekte bezüglich Weg oder Winkel in der Präzisionsgerätetechnik.

Ziel der Erfindung ist es, bei nahezu überschwingfreiem Einstellen der Position eine wesentliche Verkürzung der Positionierzeit bei höchster Genauigkeit der Positionierung und damit eine Erhöhung der Arbeitsproduktivität zu ermöglichen.

Gemäß der Erfindung ist vorgesehen, daß über ein Stellsystem mit großem Aussteuerbereich die einzustellende physikalische Größe verändert wird und über ein Meßsystem die zur Positionierung erforderlichen Signale gewonnen werden.

Die Regelabweichung wird in einem Positionsregler in Abhängigkeit von ihrer Amplitude nichtlinear verstärkt und gleichzeitig wird im Positionsregler die Phasenlage der Regelabweichung nichtlinear korrigiert.

Weiterhin werden bei kleinen Regelabweichungen dem Positionsregler zusätzlich Rückkopplungssignale zugeführt, die direkt aus dem Objekt oder aus dem Meßsystem gewonnen werden. Bei kleinen Regelabweichungen soll eine größere Verstärkung als bei großen Ablagen erfolgen und eine frequenzabhängige Phasenvoreilung von 90 ° und mehr unter Beibehaltung der Amplitude erzeugt werden. Als Stellsystem mit großem Aussteuerbereich werden Stellglieder mit interner Rückkopplung verwendet, so daß eine Grob-Feinumschaltung nicht erforderlich ist.

Es wird vorausgesetzt, daß die dynamischen Eigenschaften des zu verstellenden Objektes bekannt bzw. meßbar und zeitlich in bestimmten Grenzen invariant sind und daß ein Meßsystem mit der erforderlichen Auflösung und Genauigkeit (in Abhängigkeit der konkreten Aufgabenstellung auch Relativgenauigkeit) sowie der notwendigen Langzeitkonstanz vorhanden ist, mit dem dynamisch gemessen werden kann.

Einzelheiten der Erfindung sind in der Patentschrift dargelegt.

mst 7501

Linear Regression Analysis. Von *G. A. F. Seber* (in Russ.). Moskau: Mir 1980. 456 Seiten, 17 Bilder, 23 Tafeln.

Die Parameterschätzung ist bekanntermaßen eines der schwierigsten Probleme bei der Anwendung mathematischer Modelle. Gegenwärtig müssen oftmals theoretisch gut fundierte Modellansätze für praktische Anwendungen verworfen werden, weil es nicht gelingt, die in ihnen enthaltenen Parameter unverzerrt und mit ausreichender statistischer Sicherheit zu schätzen. Der Autor des vorliegenden Buches beschränkt sich auf lineare Modelle und gibt einen umfangreichen Überblick über moderne theoretische Untersuchungsergebnisse auf dem Gebiet der linearen Regression. Grundkenntnisse der mathematischen Statistik voraussetzend wird die Aufmerksamkeit der Leser durchgehend auf rechentechnische Aspekte gelenkt. Besondere Bedeutung kommt dabei einer ausführlichen Analyse der den einzelnen Programmen zugrunde liegenden Algorithmen der Regressionsanalyse und ihrer programmtechnischen Realisierung zu. Systematisch dargelegt werden auf dieser Grundlage verschiedene heuristische Methoden zur Auswahl der besten Untermenge der Faktoren sowie Verfahren zur Ergebniskorrektur bei Ergänzung oder Reduktion von Faktoren. Darüberhinaus sind die Grundlagen der linearen Regression, die damit zusammenhängenden Probleme der statistischen Schätz- und Testverfahren sowie die Ermittlung der Konfidenzintervalle behandelt. Ausgehend von einer Analyse der wesentlichen Voraussetzungen der Anwendung der Regressionsanalyse untersucht *Seber* Verletzungen der einzelnen Annahmen und die sich dabei ergebenden Auswirkungen. Die Darlegung zur Dispersions- und Kovarianzanalyse beruhen auf der Theorie der Regressionsanalyse, wodurch eine einheitliche und klare Darlegung möglich wird.

B 1456 *J.-A. Müller*

Vergleichsmethode in der mathematischen Systemtheorie. Von *V. M. Matrosov, L. Ju. Anapol'skij* und *S. N. Vasil'ev* (in Russ.). Novosibirsk: Nauka 1980. 481 Seiten, 15 Bilder, 5 Tafeln.

Anliegen der Systemtheorie ist die Herausbildung einheitlicher Beschreibungsverfahren, allgemeiner Gesetzmäßigkeiten und Prinzipien der Konstruktion, Organisation, Funktionsweise, Entwicklung, Steuerung und Adaption verschiedenartiger Systeme, unabhängig von ihrer materiellen Natur und Anwendung.
Besondere Bedeutung erhielt in diesem Zusammenhang die mathematische Systemtheorie. Gegenstand der vorliegenden Monographie ist eine axiomatische Systemtheorie, die die verschiedenen Herangehensweisen an die axiomatische Systembeschreibung auf der Grundlage der Logik, der Mengenlehre, Algebra bzw. Topologie umfaßt und eine einheitliche Methode zur Analyse der wesentlichen Eigenschaften und zur Synthese von Steuerungssystemen darstellt. Diese Herangehensweise wird Vergleichsmethode genannt und beruht auf der Anwendung der klassischen Ljapunovfunktionen. Die Grundidee besteht darin, daß für ein gegebenes System einige Funktionen und Vergleichssysteme gebildet werden, die für die Untersuchung besser geeignet sind als das Ausgangssystem. Dabei folgen die verschiedenen Eigenschaften des Ausgangssystems aus entsprechenden Eigenschaften der Vergleichssysteme. Das Vergleichsprinzip, das von den Autoren der Arbeit entwickelt wird, ermöglicht, Vergleichstheoreme für viele dynamische Systemeigenschaften und abstrakte Steuerungssysteme zu formulieren. Gleichzeitig werden damit neue Entwicklungsrichtungen auf dem Gebiet der künstlichen Intelligenz ermöglicht. Beim Leser sind hohe mathematische Kenntnisse vorausgesetzt.

B 1454 *J. Peters*

Identification of Industrial Processes. Von *N. S. Rajbman* und *V. M. Chadeev.* Amsterdam/New York/Oxford: North-Holland Publishing Company. 1980. 435 Seiten, zahlr. Bilder und Tafeln.

In der vorliegende Monographie — einer Übersetzung einer sowjetischen Arbeit — werden allgemeine Methoden und Algorithmen zur Identifikation von Produktionsprozessen vorgestellt. Hierbei handelt es sich um die Bestimmung von Parametern, welche jeweiligen Vorgang wesentlich beschreiben. Diese Parameter können gegebenenfalls als Grundlage für weitergehende Steuerungsansätze dienen.
Den Ausgangspunkt bilden jeweils lineare oder nichtlineare stochastische Modelle der zu identifizierenden Prozesse. Dabei werden auch nichtstationäre, d. h. sich zeitlich ändernde, Ansätze zugelassen. Die angewandten Algorithmen stammen zum großen Teil aus der eigenen umfangreichen Forschungsarbeit der Autoren.
Einen Schwerpunkt des Buches bilden adaptive Algorithmen. Hierbei wird ein Ansatz gewählt, bei welchem die zeitveränderliche Ausgangsgröße eine Linearkombination aus zeitveränderlichen Eingangsgrößen und den zeitveränderlichen zu identifizierenden Parametern bilden. Unter gewissen Voraussetzungen werden hierzu asymptotische Güte- und Konvergenzkriterien abgeleitet. Die Bedeutung von allgemeinen Identifikationsmethoden liegt vor allem in ihrer Anwendung bei der Beherrschung und Steuerung umfangreicher technischer Systeme. Die von den Autoren entwickelten Methoden leisten hierzu einen wichtigen Beitrag, was auch dank verschiedener Beispiele aus der industriellen Praxis belegt wird. In den letzten Jahren finden solche und ähnliche, aus der Regelungstheorie entwickelte, Identifikationsmethoden auch verstärkt in nichttechnischen Gebieten, wie z. B. Medizin, Biologie oder Ökonomie, Anwendung. Das Buch, welches auch im Verlag Technik in deutscher Übersetzung erschienen ist, liefert zu den erwähnten Fragestellungen einen wichtigen Beitrag.

B 1487 *A. Neumann*

Stochastische Modelle und Methoden in der Wirtschaftsplanung. Von *Ju. M. Ermol'ej* und *A. I. Jastremskij* (in Russ.). Moskau: Verlag Nauka 1979, 256 Seiten, 18 Bilder.

In der Anwendung von Optimierungsmodellen für die Wirtschaftsplanung vollzieht sich in zunehmendem Maße der Übergang von den nur zum Teil bewährten deterministischen Methoden (lineare, nichtlineare, diskrete und dynamische Optimierung) zu stochastischen Modellen und Methoden. Die Autoren untersuchen Probleme der Anwendung mathematischer Modelle in der Wirtschaftsplanung bei unvollständiger Information. Eine wesentliche Ursache für unvollständige Informationen resultiert aus dem Zufallscharakter vieler Prozesse und Parameter.
Eine Möglichkeit der Berücksichtigung des nichtdeterminierten Charakters von Eingangsinformationen stellt die Anwendung von Modellen und Methoden der stochastischen Optimierung dar. Deshalb stellen die Autoren die Entwicklung und Anwendung von Methoden der quantitativen und qualitativen Analyse für stochastische Modelle in der Wirtschaft in den Mittelpunkt ihrer Ausführungen.
Ausgehend von verschiedenen stoachstischen Aufgabenstellungen der optimalen Planung (Kapitel 1) werden Methoden der stochastischen Optimierung wie die stochastischen Quasigradientenmethoden (Kapitel 2) und schließlich praxisbezogene Modelle der Lagerhaltung, Produktionssynchronisation und Standortverteilung (Kapitel 3) behandelt.
Im Kapitel 4 gehen die Autoren auf die sehr wichtigen Dualitätsbeziehungen in der stochastischen Optimierung und ihre ökonomische Interpretation ein. Von ebenso großer praktischer Relevanz sind die Analyse des dynamischen

stochastischen Produktionsmodells und die Methoden der ökonomisch-mathematischen Analyse stochastischer Modelle für Praxisaufgaben (Kapitel 5) sowie die stochastischen Verflechtungsmodelle (Kapitel 6).
Im abschließenden Kapitel 7 wird das Problem des Optimalitätskriteriums diskutiert. Zugleich enthält dieses Kapitel Ausführungen über die sehr an Bedeutung gewinnende stochastische Dialogmethode zur Ermittlung einer effektiven Lösung. Für den mathematisch vorgebildeten Leser wird das Studium dieses Fachbuches eine echte Bereicherung sein. B 1467 *G. Peißker*

Analysis and Optimization of Systems. (Proceedings of the Fourth International Conference on Analysis and Optimization of Systems, Versailles, December 16—19, 1980). Von *A. Bensoussan* und *J. L. Lions*. Westberlin/Heidelberg/New York: Springer-Verlag 1980. 999 Seiten (206 Seiten in Franz.), 167 Bilder, 23 Tafeln.

Dieser Band 28 der von Steuerungstechnikern geschätzten Reihe faßt die Vorträge der genannten Konferenz in elf Kapiteln zusammen. In 6 Kapiteln findet man theoretische Arbeiten über große, mehrvariable, adaptive und stochastische dynamische Systeme sowie Anwendungen der Spieltheorie bzw. der algebraischen und geometrischen Systemtheorie. Der optimalen Steuerung und adaptiven Regelung von Systemen mit verteilten Parametern, an konkreten Prozessen abgehandelt, sind 6 Vorträge gewidmet. Im Kapitel „Ökonomische Systeme" wird deutlich, wie in immer stärkerem Maße Methoden der Optimalsteuerungstheorie zur Lösung aggregierter ökonomischer Aufgaben herangezogen werden. Die speziellen Kapitel über Methoden und Algorithmen zur Bilderkennung sowie über Simulation und Modellbildung von Öl-Lagerstätten haben großen Anwendungsbezug. Ein letztes Kapitel behandelt die Applikation von Mikroprozessoren für Steuerungszwecke im technischen und medizinischen Bereich, wobei auch Mehrprozessor- und Mehrebenen-Strukturen Berücksichtigung fanden. Übersichtsartikel namhafter Autoren, die den aktuellen Stand bestimmter Disziplinen darlegen und einschätzen, aber auch die mit Applikationen kombinierten Arbeiten kennzeichnen den Wert des Buches vor allem für die Leser, die sich mit der Anwendung und Entwicklung moderner Steuerungsmethoden befassen.
B 1492 *H. Puta*

Entwurf aktiver Analogsysteme. Netzwerke III. Von *G. Fritzsche*. Berlin: Akademie-Verlag 1980. 223 Seiten, 58 Bilder, 28 Tafeln, 12.50 M.

Das Werk stellt den 3. Band einer vierteiligen Darstellung über elektrische Netzwerke innerhalb der Reihe „Wissenschaftliche Taschenbücher Mathematik/Physik" dar. In diesem Band geht es um die Analyse und den Entwurf aktiver analoger RC-Netzwerke. Darunter werden hier Strukturen mit endlich vielen konzentrierten Elementen (Widerstände, Kondensatoren und aktive Elemente) verstanden, also elektrische Schaltungen ohne Spulen, deren Ausführungsformen der Mikroelektroniktechnolgie angepaßt sind.
In dem Kapitel über die Analyse werden die mathematische Beschreibung aktiver Elemente, praktische Analysemethoden sowie die Stabilitätsbeurteilung von Schaltungen behandelt. In dem Kapitel über Entwurf werden typische Approximationsansätze und (katalogisierte) Approximationsergebnisse vorgestellt. Auf die Kaskadentechnik und die Direkte Technik (insbesondere universelles Konverterkonzept und Multi-loop-feedback-Methoden) wird ausführlicher eingegangen.
Das Buch ist in erster Linie für Ingenieure und Studenten des Elektroingenieurwesens bestimmt. Zahlreiche Beispiele erleichtern das Verständnis. Der Verfasser will mit der vorliegenden Darstellung „sowohl überblicksmäßig in das Fachgebiet einführen als auch leitfadenmäßig wesentliche Ergebnisse bereitstellen." Bei der Bewältigung dieser Aufgabe baut der Verfasser auf seinen reichen Erfahrungen als Hochschullehrer auf. Stets wird in erster Linie das technische Verständnis des Lesers und nicht so sehr sein mathematisches Abstraktionsvermögen angesprochen. B 1443 *K. Reinschke*

Control and Coordination in Hierarchical Systems. Von *W. Findeisen*, *F. N. Bailey*, *M. Brdyś*, *K. Malinowski*, *P. Tatjewski* und *A. Wozniak*. Chichester/New York/Brisbane/Toronto: John Wiley & Sons 1980. 467 Seiten, zahlr. Bilder und Tafeln.

Im Rahmen der vom Internationalen Institut für Angewandte Systemanalyse herausgegebenen Buchreihe legen die Autoren, die bis auf *Bailey* (Universität Minnesota) alle dem Institut für Automatik des Polytechnikums Warschau angehören, die Theorie hierarchischer Systeme dar, soweit diese für die Optimierung und Steuerung komplexer Prozesse Bedeutung haben. Sie konzentrieren sich dabei stark auf die von ihnen selbst erbrachten Ergebnisse. Da diese Arbeiten einen nach Umfang und Bedeutung ganz wesentlichen Beitrag zum internationalen Stand darstellen, bedeutet das keine erhebliche Beschränkung der Thematik. Vielmehr wird eine sehr tiefgründige Behandlung fast aller wichtigen Methoden zur hierarchischen Optimierung und zur hierarchischen Steuerung stationärer und dynamischer Prozesse vorgelegt.
In einer sehr hilfreichen und umfangreichen Einführung werden zunächst die Prinzipien des Aufbaues von Mehrschicht- und Mehrebenensystemen sowie die Probleme des strukturellen Entwurfs der Informationserfassung und -verteilung verständlich gemacht. Das nächste Kapitel bringt dann eine sehr ausführliche Darstellung und Untersuchung der Anwendbarkeitsbedingungen aller wichtigen Koordinationsmethoden. In den folgenden Kapiteln wird sehr gründlich die Anwendung dieser Methoden zur iterativen Koordination bei der Optimierung des stationären Prozeßverhaltens sowie zur repetierenden Optimierung von dynamischen Prozessen unter Einwirkung von Störungen untersucht. Die vorgeschlagenen Strukturen basieren auf (zeitdiskreten) Rückführungen vom gesteuerten Prozeß zu den lokalen Steuereinrichtungen und zum Koordinator. Für den dynamischen Fall erfolgt eine Beschränkung auf die Anwendung der Preismethode und die Einbeziehung der konjugierten Variablen als Koordinationsinstrumente. Wertvoll ist hier weiterhin eine Darstellung der Problematik der dezentralen Regelungen unter dem hierarchischen Aspekt, wobei verschiedene Möglichkeiten der Einbeziehung eines zentralen Reglers (Koordinators) diskutiert werden.
Das Buch schließt mit einer bisher ungebührlich vernachlässigten Problematik: dem strukturellen Entwurf des aus Beobachtung und Informationsverteilung bestehenden Informationsprozesses. Wegen der damit verbundenen erheblichen Kosten und der engen Wechselwirkung mit dem Entscheidungs-(-Informationsverarbeitungs-) Prozeß ist dieses, von *Bailey* verfaßte Kapitel — obwohl diese Untersuchungen noch im Anfangsstadium sind — als Anstoß für weitere Untersuchungen besonders zu begrüßen.
Wegen der Aufgaben, immer größere Systeme möglichst günstig, zuverlässig und flexibel — automatisch oder von Hand — zu steuern, nehmen die Bedeutung und Anwendung von Hierarchiemethoden gegenwärtig rasch zu. Das Buch wird für die damit befaßten Wissenschaftler und Ingenieure durch seine grundsätzlichen Überlegungen, durch eine Fülle von Anregungen und durch die gründliche Erforschung der Anwendbarkeitsbedingungen der verschiedenen Methoden eine wertvolle Hilfe sein. B 1438 *K. Reinisch*

Information in unserem Leben. Von *N. T. Petrowitsch*. Moskau: Verlag Mir; Berlin: VEB Verlag Technik 1978 (Gemeinschaftsausgabe). 232 Seiten, 66 Bilder, 10,— Mark. Bestell-Nr. 5524828

Es ist zweifellos eine vordringliche gesellschaftliche Aufgabe, in unserem Zeitalter des stürmischen wissenschaftlich-technischen Fortschritts die bestehende Kluft zwischen technischer Vervollkommnung und dem Verständnis des nicht speziell vorgebildeten Bürgers abzubauen. Der bedeutende sowjetische

Nachrichtentechniker Prof. *Petrowitsch* hat ein Buch vorgelegt, das diesem Anspruch in hohem Maße gerecht wird. Das ist im besten Sinne des Wortes populärwissenschaftliche Literatur, wenn es ein angesehener Experte, ausgestattet mit tiefem Fachwissen und breiter Allgemeinbildung, versteht, eine wissenschaftlich-technische Disziplin klar und verständlich und gewürzt mit Bildern, Beispielen und Analogien aus dem täglichen Leben verbal umfassend zu beschreiben, auf nahezu alles mathematische Rüstzeug zu verzichten und trotzdem in seiner Darstellungsweise weitgehend wissenschaftlich exakt zu bleiben.

Das Buch beschäftigt sich mit dem Phänomen Information. Es wird die Information und ihre zentrale Bedeutung für die Abläufe in Natur, Gesellschaft, Technik und Kommunikation dargestellt und der grundlegende Charakter für so wesentliche Wissenschaftsdisziplinen wie Kybernetik, Nachrichtentechnik, Informationstechnik, Informationsverarbeitung (EDV) usw. erläutert. Zunächst schildert der Autor die Tätigkeit des menschlichen Gehirns im Zusammenhang mit ständigen Entscheidungsfindungen unter Benutzung der zahlreichen anfallenden Informationen. Sodann zeigt er am Beispiel von Bienen, Ameisen, Fischen und Schlangen, über welche erstaunlichen Kommunikationsmittel und Informationssensoren Tiere verfügen und wie sie sie zum Zwecke der „Verständigung" einsetzen. Anschließend erläutert Prof. *Petrowitsch* die parallele Entwicklung der menschlichen Gesellschaft und ihrer Kommunikationsmittel bis hin zum Weltnachrichtensystem. Am Beispiel der Evolution wird der Begriff der Informationsverdichtung besprochen.

Im zweiten Kapitel wird der Leser mit der Bindung der Information an Raum und Zeit vertraut gemacht. Im Zusammenhang mit der Ausbreitung von Informationen lernt er solche Begriffe, wie Informationsträger, Schwingung, Wellenlänge, Modulation (und -sarten), Spektrum, Signalleistung, Störung, Sender, Empfänger, Anpassung, Frequenzbereiche u. a. verstehen. Im Verein mit den räumlichen Informationsträgern Schall, Licht, elektrischer Strom, Radiowellen und Laser erfährt man Wissenswertes zu akustischen Informationsproblemen, zur Entwicklung der Optik und der Physik allgemein (ist Licht Welle oder Teilchen ?), zur Entwicklung der informationellen Elektrotechnik, zur Entwicklung der Radio- und Fernsehtechnik bis hin zur Nachrichtensatellitentechnik und zu optischen Lasergeneratoren. Das Problem der Informationsübertragung in der Zeit korrespondiert eng mit dem menschlichen Gedächtnis bzw. dem technischen Informationsspeicher (Papier, Buchdruck, Fotografie, Film, Tonband, Ferritkern usw.). Ein wichtiger Aspekt ist dabei die Verzerrung der gespeicherten Information durch Störeinflüsse. Mit diesem Problem setzt sich der Autor auch im nächsten Kapitel auseinander, wenn er nun fragt: Was ist das — eine Information ? Er erläutert die Bindung der Informationsübertragung an die Elemente Sender, Übertragungskanal, Empfänger und die Bindung der Information selbst an das Leben. Information und Steuerung werden als Basis für die Existenz biologischer Organismen definiert, und dem schließt sich eine Begriffsbestimmung für die Information an. Sodann wird die Informationsmenge „Bit" definiert. Im Zusammenhang mit der Digitalisierung analoger Signale werden das Abtasttheorem, das Theorem von *Kotelnikow*, das Dualsystem und das Problem der Störungen und der Versuche ihrer Bekämpfung besprochen. Einen breiten Raum nimmt im folgenden Kapitel der „ideale Empfänger" von *W. Kotelnikow* ein. Dabei werden die Bedingungen für minimale Verzerrungen aufgestellt und der optimale Empfänger auf der Basis der Kotelnikowschen Ungleichung gefunden. Es wird gezeigt, warum der Bau des idealen Empfängers praktisch nicht realisierbar ist und wie man ihm mit Hilfe der Phasenverhältnismodulation nahekommt. Möglichkeiten zur Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses werden angeführt, und deren wichtigste, die Signalkodierung (und -dekodierung) im Sinne des klassischen Modells von *C. Shannon*, wird im folgenden Kapitel ausführlich besprochen. Dabei kommt so grundlegenden Begriffen wie Redundanz, Entropie usw. große Bedeutung zu. Weiterhin werden die Ideen von *N. Wiener* zur Kybernetik als allgemeingültige Möglichkeit zur Bekämpfung von Störungen aufgezeigt, wobei die fundamentale Bedeutung der Rückführung erläutert wird. Eine Überraschung erwartet den Leser im vorletzten Kapitel. Der Autor berichtet von der Bjurakaner Konferenz „Kontakte zu außerirdischen Zivilisationen" vom 6. bis 11. September 1971, an der er selbst im Kreise namhafter Wissenschaftler aus aller Welt teilnahm. Das sehr ernsthafte Anliegen dieser Konferenz waren die Möglichkeiten der Herstellung von nachrichtentechnischen Kontakten zu außerirdischen Lebewesen und deren Erfolgschancen, die anhand der „Formel für die Bestimmung der Anzahl der außerirdischen Zivilisationen in unserer Galaxis" von *F. Drake* gemessen wurden. Phantastisch anmutende Projekte für eine solche Kontaktaufnahme wie das von *F. Dyson* u. a. werden entmythisiert und als durchaus nicht gänzlich unrealistisch empfunden, und die Bjurakaner Ergebnisse werden erläutert und eingeordnet. Das letzte Kapitel setzt sich mit der ständig steigenden Informationsflut und deren außerordentlicher Gefahr für die Menschheit auseinander. Hierbei wird das Exponentialgesetz besprochen, nach dem sich die Entwicklung der Hauptkenngrößen der menschlichen Gesellschaft vollzieht. In optimistischer Weise erläutert der Autor Wesen und Grenzen dieses Gesetzes insbesondere auch für seine Anwendung auf die „Informationsexplosion", und er diskutiert die Begriffe Informationssättigung, Informationsüberproduktion und baut auf eine denkbare Lösung des Informationsproblems durch die gewaltigen Möglichkeiten der EDV.

Dieses umfangreiche Themenspektrum mit einer Fülle von Detailinformationen wird dem Leser in sehr verständlicher und oft vergnüglicher Form dargeboten. Es kann dem Fachmann (aus didaktischen Gründen und zur Wissensergänzung) wie dem Laien (zum schnellen Einarbeiten in die an und für sich mathematisch sehr anspruchsvolle Materie) nur empfohlen werden. Es ist ein Buch, das seinen Titel gerecht wird, es dient der Information über unser Leben!

B 1515 *D. Werner*

Norbert Wiener. Von *H. J. Ilgauda.* Leipzig: BSB B. G. Teubner Verlagsgesellschaft 1980. 86 Seiten, 6 Bilder, 4 Schemata, 4,80 Mark.

Die Broschüre gehört zu der Schriftenreihe „Biographien hervorragender Naturwissenschaftler, Techniker und Mediziner".

In knapper Form berichtet der Verfasser über *Wieners* Persönlichkeitsentwicklung, Berufsausbildung, Tätigkeit als Hochschullehrer und ausgeprägte berufliche Reisetätigkeit innerhalb und außerhalb der USA.

Gut dargestellt ist die Wechselwirkung verschiedener Disziplinen, mit denen sich *Wiener* intensiv befaßt hat. Bis in die 30er Jahre arbeitete er — im wesentlichen von physikalischen Fakten ausgehend — an Problemen der harmonischen Analyse, Operatorenrechnung, Potentialtheorie, wobei Fragen der Zufallsprozesse, Optik, Diffusion, Quantenmechanik u. a. eine Rolle spielten. Ein weiteres Kapitel berichtet über *Wieners* Arbeiten zur Vorhersagetheorie, Nachrichten- und Rechentechnik bis in die Mitte der 40er Jahre. Systematisch aufbauend auf seinen Erkenntnisschatz vereinte *Wiener* die seit Jahrhunderten erkannten Analogiebeziehungen zwischen Lebewesen, Maschinen und Automaten zu dem weltbedeutenden Wissenschaftsgebiet der Kybernetik.

Kritische Bemerkungen macht der Verfasser zu *Wieners* exzentrischer Persönlichkeit und seinen schwachen gesellschaftlichen Kenntnissen, die ihn nicht immer zu richtigen ideologischen Einstellungen führten.

Übersichtlich, systematisch aufgebaut wirkt das Buch ansprechend auf den Leser. Mit schematischen Darstellungen verdeutlichte es die Mannigfaltigkeit der Forschungsgebiete *Wieners*. Verzichten könnte man auf unvermittelt wirkende mathematische Passagen und wegen Redundanz auf das erste Schema. Insgesamt ist die Abhandlung demjenigen zu empfehlen, der sich rasch und umfassend über *Wiener* informieren will.

B 1465 *H. Rohr*

Postgraduales Studium Informationsverarbeitung, Matrikel IV

Die Technische Universität Dresden, Sektion Informationsverarbeitung, führt von Juni 1982 bis April 1984 zum vierten Mal ein postgraduales Studium Informationsverarbeitung in Form eines Fernstudiums (10 ein- bzw. zweiwöchige Studienkurse mit insgesamt 420 h Lehrveranstaltungen und 880 h Selbststudienzeit) durch. Es umfaßt die Lehrgebiete Marxismus-Leninismus, Mathematik (Grundlagen der Mengenlehre, Algebra und Automatentheorie; Wahrscheinlichkeitsrechnung und mathematische Statistik; numerische Verfahren), Mikrorechner (Aufbau von Mikrorechnern; Programmierung; Mikrorechnerpraktikum), automatisierte Informationssysteme (kybernetische Grundlagen; Informationstheorie; Steuerung und Regelung; Speicher- und Rechnersysteme; Prozeßrechentechnik; EDV in Leitung und Planung; Betriebsorganisation im ORZ), Programmierungstechnik (spezielle Programmiersprache (CDL); Theorie und Methodik der Programmierung; Betriebssysteme; Theorie der Programmiersprachen; Praktikum) und wird mit einer Abschlußarbeit beendet.

Als Bewerber kommen Hoch- und Fachschulabsolventen einer naturwissenschaftlichen, ingenieurtechnischen oder ökonomischen Fachrichtung (außer Informationsverarbeitung und MKR) in Frage, die eine mindestens zweijährige EDV-Berufspraxis, gute Kenntnisse einer Programmiersprache und gute mathematische Grundkenntnisse haben.

Bewerbungen und Anfragen sind zu richten an:
Technische Universität Dresden, Direktorat für Studienangelegenheiten, 8027 Dresden, Mommsenstr. 13.

2. Nationale TUL-Konferenz

Am 15. und 16. April 1982 findet im Hygiene-Museum in Dresden die o. g. Konferenz statt. Sie wird mit einer Plenarveranstaltung zu den volkswirtschaftlichen und wissenschaftlichen Aufgaben bei der Rationalisierung der TUL-Prozesse eröffnet. Die Weiterführung erfolgt in vier Sektions-Veranstaltungen:

Sektion 1: Rationalisierung des innerbetrieblichen Transports und des Umschlags
Sektion 2: Rationalisierung der Lagerung
Sektion 3: Reduzierung des volkswirtschaftlichen Transportaufwandes
Sektion 4: Leitung und Qualifizierung.

Interessenten wenden sich bitte an die AG (Z) Transportrationalisierung beim Präsidium der KDT, 1086 Berlin, Clara-Zetkin-Str. 115–117.

11. Jahrestagung „Grundlagen der Modellierung und Simulation"

In der Zeit vom 29. September bis 1. Oktober 1982 findet in Rostock an der Wilhelm-Pieck-Universität die von der WGMA gemeinsam mit der AdW der DDR gestaltete o. g. Tagung statt. Folgende thematische Schwerpunkte sind geplant:

- Simulation
  - kontinuierlicher Modelle (mit konzentrierten und verteilten Parametern)
  - diskreter Modelle
  - kombinierter Modelle
- Modellbildung und Simulation in der
  - Verfahrenstechnik und von Wärmeprozessen
  - Elektrotechnik und Elektronik in der Entwurfs- und Testphase
- Optimierung in Modellbildung und Simulation.

Voranmeldungen sind zu richten an:
Kammer der Technik — Präsidium —, WGMA Dipl.-Ing. *K.-D. Müller*, DDR-1086 Berlin, Clara-Zetkin-Str. 115–117, Telefon: Berlin 2202531, App. 318.

5. Aachener Fluidtechnisches Kolloquium

23. bis 25. März 1982 in Aachen/BRD. Es werden aktuelle Probleme bei der Neu- und Weiterentwicklung sowie dem Betrieb und der Wartung von hydraulischen und pneumatischen Komponenten und Systemen behandelt.

Themengruppen:

- Neu- und Weiterentwicklungen im Bereich hydraulischer Komponenten
- Neu- und Weiterentwicklungen im Bereich hydraulischer Schaltungen und Systeme
- Maßnahmen und Mittel zur leckfreien Hydraulik
- Auswirkungen des Druckübertragungsmediums auf Funktion und Lebensdauer hydraulischer Komponenten und Systeme
- Gerätetechnik und schaltungstechnische Maßnahmen zur Energieeinsparung in der Pneumatik
- Neu- und Weiterentwicklung im Bereich pneumatischer Komponenten und Systeme.

Ungarische Magnetblasenspeicher für EDV

In der Ungarischen VR wurde ein Magnetblasenspeicher für die rechentechnische Informationsspeicherung entwickelt, der die Größe von knapp einer halben Streichholzschachtel hat. Dieser Magnetblasenspeicher wird in Konkurrenz zum bisher üblichen Magnetbandspeicher treten.

Der Vorteil des Magnetblasenspeichers besteht darin, daß er keine mechanischen Teile, wie Band, Lager, Schalter u. a. benötigt, da sich die Information im Blasenspeicher in Form eines magnetischen Zeichens bewegt. Die Informationsspeicherung ist auf diese Weise weit schneller und sicherer. Jeder dieser Minispeicher kann mindestens 32000 Informationseinheiten speichern. Das Basismaterial ist Gallium, das in der Ungarischen VR ausreichend vorhanden ist.
(ADN-BWT (18) 1449)

Löschbare Programmspeicher aus der DDR

Im Glaswerk Auma des Kombinats Keramische Werke Hermsdorf begann die Produktion löschbarer Programmspeicher für klimabelastete Industrieautomaten. Diese mikro-elektronischen Bauelemente sind mit „Fenstern" aus transparenter Oxidkeramik versehen, wodurch Löschen und Neuprogrammierung ermöglicht werden. Beim Löschen tritt ultraviolettes Licht durch die „Fenster", die im Gegensatz zu Glas mindestens 60% der UV-Strahlung durchlassen. Der Löschvorgang dauert nur wenige Minuten. Die Verbindung zwischen Gehäuse und Fenster wurde kostengünstig mit einheimischen Rohstoffen realisiert. Entwickelt wurden die Bausteine in Zusammenarbeit mit dem VEB Elektroglas Ilmenau und der Zentralstelle für Forschung und Technologie der Mikroelektronik, Dresden.
(ADN-BWT (18) 1452)

„Super"-Computer

Ein Rechner, der in der Sekunde einige hundert Millionen Rechenoperationen ausführen kann, soll in Japan gebaut werden. Um diese extrem hohen Rechengeschwindigkeiten zu erreichen, ist entweder der Einsatz von Bauelementen aus Galliumarsenid (diese sind schneller als die aus Silizium) oder die Ausrüstung mit supraleitenden, sogen. Josephson-Elementen vorgesehen. Im Vergleich: der Rechner „Cray I", der gegenwärtig leistungsstärkste, kann 80 Millionen Operationen je Sekunde ausführen.
(ADN-BWT (18) 1450)

KURZFASSUNGEN

Peschel, M.; Mende, W.: IA 1.1.

Probleme der mathematischen Modellierung von Evolutionsprozessen

msr 24 (1981) H. 11, S. 602–606

In Abgrenzung vom sog. exponentiellen Wachstum, das praktisch kaum gegeben ist, wird ein realistischeres Wachstumsmodell mit einer Potenzprodukttriebkraft vorgeschlagen. Als Alternativen werden Strukturen Pearson-Typ I und Pearson-Typ II angeboten. Hinter den vorgestellten Wachstumsmodellen steht ein Prinzip zum Strukturentwurf nichtlinearer und instationärer Prozesse, das immer zu Strukturen in Gestalt von Bilinearsystemen führt, die autokatalytisch von 2. Ordnung sind. Bezüge zum Hyperzyklus nach *M. Eigen* und *P. Schuster* werden hergestellt. Die Entwicklung in Kettenform mit dem Exponentialintegrator als Basismodul ist eine Alternative zur herkömmlichen Taylor-Entwicklung.

Bendel, U.: IA 1.1.

Ein dynamisches Herzkammermodell auf der Grundlage des Modells eines gekrümmten Muskels

msr 24 (1981) H. 11, S. 617–622

Auf der Grundlage eines Muskelmodells wird ein Herzkammermodell aufgebaut. Die sich ergebenden Gleichungen sind auf allen Stufen stets zwei gekoppelte Differentialgleichungen, die wegen der vorausgesetzten Linearität laplacetransformiert angegeben werden. Die Übertragungsfunktionen, die die Struktur der Differentialgleichungen beinhalten, werden von Stufe zu Stufe komplizierter. Das Modell gestattet die Lösung praktischer Fragestellungen.

Steinmüller, K.: IA 5.9.3.

Zur Steuerung von Schaderregern in Agroökosystemen

msr 24 (1981) H. 11, S. 623–626

Anhand von zwei Modellansätzen werden steuerungstheoretische Überlegungen zur optimalen Steuerung von Schaderregern in Agroökosystemen vorgestellt. Das Modell einer Schaderreger-Einzelpopulation besteht aus je einer partiellen Differentialgleichung für die Abundanz und das physiologische Alter, in denen der Einfluß von Umweltfaktoren berücksichtigt wird. Als Steuerung wird eine zeitkontinuierliche Reduktion der Abundanz betrachtet. Ein Zielfunktional wird formuliert. Mit Hilfe des Pontrjaginschen Maximumprinzips läßt sich eine optimale Steuerung ableiten. Ein Schaderreger-Predatoren-System wird durch ein einfaches populationsdynamisches Modell beschrieben. Je nach Lage des nichttrivialen Gleichgewichtspunktes und der Bekämpfungsschwelle ist eine permanente Unterdrückung von Schaderregerausbrüchen (Stabilisierung) möglich oder nicht. Als Steuerung werden zeitdiskrete Veränderungen der Abundanzen betrachtet.

Klett, E.: IA 1.1.6.0.

Untersuchungen zur Bestimmung mathematischer Modellansätze bei Regressionsanalysen

msr 24 (1981) H. 11, S. 630–633

Die Regressionsanalyse ist eine in den technischen Wissenschaften sehr häufig angewendete Methode zur mathematischen Darstellung experimenteller Meßdaten. Der dazu notwendige mathematische Apparat ist für den Anwender sehr gut aufbereitet. Nicht genügend untersucht ist dagegen die Begründung der Modellansätze. Es werden theoretische Vorstellungen entwickelt, um zu zeigen, wie die Form der Modellansätze durch die Experimentiermethodik bestimmt ist.

Rudenko, O. G.: IA 2.5.; 2.6.

Untersuchung adaptiver Algorithmen zur Identifikation von Steuerungsobjekten

msr 24 (1981) H. 11, S. 633–636

Im Beitrag werden zwei vom Verfasser entwickelte Adaptionsalgorithmen (Einschritt- und Mehrschrittalgorithmus) vorgestellt. Die durchgeführten Testrechnungen führen zu Angaben über Konvergenzgeschwindigkeit und Identifikationszeit für Ein- und Mehrgrößensysteme mit und ohne stochastische Störungen. Als praktikable Vorgehensweise wird die Kombination eines Mehrschrittalgorithmus in der ersten Phase mit einem Einschrittalgorithmus in der letzten Phase des Identifikationsprozesses vorgeschlagen. Die Abbildungen zeigen im Vergleich die Arbeitsweise eines Robbin-Monro-Algorithmus mit einem Zweischrittalgorithmus.

Janke, L.: IA 2.5.

Vergleichsmodelladaption bei Stellsignalbegrenzung und Strukturunterschieden zwischen Modell und Objekt

msr 24 (1981) H. 11, S. 637–640

Der Entwurf eines vergleichsmodelladaptiven Systems mit der direkten Methode von *Ljapunov* setzt voraus, daß Objekt und Vergleichsmodell in ihrem Verhalten durch den adaptiven Eingriff in Übereinstimmung zu bringen sind. Am Beispiel eines Lageregelkreises mit Stellsignalbegrenzung werden einige Maßnahmen gezeigt, um das Verhalten annähernd in Übereinstimmung zu bringen, auch bei Strukturunterschieden zwischen Vergleichsmodell und Objekt.

Woschni, E.-G.: IA 4.0.5.

Korrekturmöglichkeit des Systemverhaltens durch Rechner — erhöhte Anforderungen an die Qualität der Originalsysteme

msr 24 (1981) H. 11, S. 640–642

Nach einem Überblick über Kriterien zur Beurteilung der Systemgüte werden die Grenzen näher untersucht, die sich für verschiedene Systeme als Beispiele hinsichtlich der Wirksamkeit von Korrekturprogrammen ergeben. Im einzelnen handelt es sich hierbei um lineare Systeme mit überwiegenden statistischen Fehlern, aber „dynamischer Reserve", bei denen unter angegebenen Bedingungen Verbesserungen durch I-Programme zu erreichen sind, sowie um Systeme mit überwiegenden dynamischen Fehlern. Die Auswirkungen von Nichtlinearitäten sowie bezüglich der Parameterempfindlichkeit werden ebenfalls erwähnt. Ferner werden die Möglichkeiten der Korrektur mitnahmebedingter Frequenzfehler betrachtet. In allen Fällen zeigt es sich, daß die Effektivität der eingesetzten Rechenprogramme und damit die mögliche Fehlerreduzierung in entscheidendem Maße von der Güte der Originalsysteme abhängt.

РЕЗЮМЕ

Peschel, M.; Mende, W.: ИА 1.1.

О проблеме математического моделирования процессов эволюции

msr 24 (1981) №. 11, стр. 602–606

В разграничении от так называемого экспенонциального роста, который практически едва ли бывает, предложена более реалистическая модель роста с движущейся силой произведения степени. Как альтернативы предлагаются структуры Пирсона типа I и Пирсона типа II. За представленными моделями роста имеется принцип по разработке струтуры нелинейных и нестационарных процессов, которые всегда приводит к структурам в виде билинейных систем, которые автокаталитически являются системами 2-го порядка. Произведены отношения к гиперциклу по М. Айгену и П.Шустеру Развитие в виде цепей с экспоненциальным интегратором как базисная модель является альтернативой к традиционному разложению в ряд Тейлора.

Bendel, U.: ИА 1.1.

Динамическая модель желудочка сердца на базе модели искривленной мышцы

msr 24 (1981) №. 11, стр. 617–622

На базе модели построена модель желудочка сердца. Полученные уравнения во всех уровнях всегда два соединенных дифференциальных уравнения, которые из-за предположенной линейности указаны преобразованными по Лапласу. Функции передачи, включающие структуру дифференциальных уравнений, становятся сложнее от уровня до уровня. Модель допускает решение практических постановок вопросов.

Steinmüller, K.: ИА 5.9.3.

Об управлении возбудителями вреда в агроэкосистемах

msr 24 (1981) №. 11, стр. 623–626

На основе двух модельных подходов представлены теоретические соображения оптимального управления возбудителями вреда в агроэкосистемах. Модель отдельной популяции возбудителей вреда состоит из парциального дифференциального уравнения, каждого, для избыточности и физиологического возраста, в которых учитывается влияние факторов окружающей среды. В качестве управления рассматривается непрерывное по времени уменьшение избыточности. Сформулирована целевая функция. С помощью принципа максимума Понтрягина может быть выведено оптимальное управление. Предаторная система возбудителей вреда описана простой популяционной динамической моделью. В зависимости от положения нетривиальной точки равновесия и порога борьбы возможно постоянное подавление всплесков возбудителей вреда (стабилизация) или нет. Как управление рассматриваются дискретные по времени изменения избыточностей.

Klett, E.: ИА 1.1.6.0.

Исследования для определения математических модельных подходов при регрессионных анализах

msr 24 (1981) №. 11, стр. 630–633

Регрессионный анализ является методом матиматического изображения экспериментальных измерительных данных, часто применяемым в области технических наук. Требуемый для этого математический аппарат очень хорошо подготовлен для потребителя. Однако, в отличие от этого обоснование модельных подходов исследовано недостаточно. Разработаны теоретические представления для того чтобы показать, каким образом определена форма модельных подходов путем методики экспериментирования.

Rudenko, O. G.: ИА 2.5.; 2.6

Исследование адаптивных алгоритмов для идентификации объектов управления

msr 24 (1981) №. 11, 633–636

В данной статье представлены два, разработанные автором адаптивных алгоритма (одношаговый и многошаговый алгоритмы). Произведенные поверочные расчеты проводят к данным о скорости сходимости и времени идентификации систем по одному и нескольким параметрам с стохастическими помехами и без них. Практическим методом предлагается комбинация многошагового алгоритма в первой фазе с одношаговым алгоритмом в последней фазе процесса идентификации. На рисунках сравнены принципы действия алгоритма РОББИНМОНРО и двушагового алгоритма.

Janke, L.: ИА 2.5.

Адаптация сравнительных моделей при ограничении регулирующих сигналов и структурных различениях между моделью и объектом

msr 24 (1981) №. 11, стр. 637–640

Разработка адаптивной системы сравнительной медели с непосредственным методом Ляпунова предполагает, чтобы объект и сравнительная модель в своих поведениях были приведены в соответствие путем адаптивного вмешательства. На примере контура регулирования положения с ограничением регулирующих сигналов показан ряд мероприятий с целью приведения поведения в приблизительное соответствие, также и при структурных различениях между сравнительной моделью и объектом.

Woschni, E.-G.: ИА 4.0.5.

Возможность коррекции поведения системы вычислительной машиной повышенные требования, предъявляемые к качеству оригинальных систем

msr 24 (1981) №. 11, стр. 640–642

После обзора о критериях оценки добротности системы более подробно исследованы границы, которые получены для различных систем как примеры относительно эффективности программ коррекции. В частности, речь здесь идет о линейных системах в большинстве случаев с статистическими погрешностями, но „динамическим резервом" при которых в приведенных условиях возможно достигать улучшений путем применения И-программ, а также о системах в большинстве случаев с динамическими погрешностями. Влияния нелинейностей, а также относительно чувствительности праметров то же указаны. Кроме того, рассмотрены возможности коррекции погрешностей частоты, условленных схватыванием. Во всех случаях показано, что эффективность применяемых вычислительных программ и таким образом возможное сокращение погрешностей в решающей мере зависят от добротности оригинальных систем.

SUMMARIES

Peschel, M.; Mende, W.: IA 1.1.

Problems of the Mathematical Modeling of Evolution Processes

msr 24 (1981) No. 11, pp. 602—606

In the contrary to the so-called exponential growth existing hardly in practice the authors propose a more realistic growth model in connection with a principle for the structural design of nonlinear and instationary processes which always leads to structures in the form of bilinear systems. Relations to the hypercycle according to M. Eigen and P. Schuster are established. The development in chain form with the exponential integrator as basis module represents an alternative to the usual Taylor series expansion.

Bendel, U.: IA 1.1.

A Dynamic Heart Chamber Model on the Base of the Model of a Bended Muscle

msr 24 (1981) No. 11, pp. 617—622

The author estabilishes a heart chamber model on the base of a muscle model. In all stages the resulting equations are always two coupled differential equations being given in their Laplace transform equivalent because of the linearity assumed. The transfer functions representing the structure of the differential equations become more and more complicated from stage to stage. The model allows the solution of practical problems.

Steinmüller, K.: IA 5.9.3.

On the Control of Harm Germs in Agro-Ecological Systems

msr 24 (1981) No. 11, pp. 623—626

By means of two model statements the author presents control-theoretical considerations for the optimal control of harm germs in agro-ecological systems. The model of a harm germ single population consists of partial differential equations for abundance and physiological age, with this environment factors being taken into consideration. A discontinuous reduction of the abundance is regarded as control. The object functional is formulated. By means of Pontrjagin's maximum principle an optimal control is derived. Furthermore a harm germ predatory systems is delt with using a simple population-dynamic model.

Klett, E.: IA 1.1.6.0.

Studies for the Determination of Mathematical Model Statements in Regression Analyses

msr 24 (1981) No. 11, pp. 630—633

In the technical sciences the regression analysis represents a method often applied to the mathematical representation of experimental measurement data. The necessary mathematical tools are very well elaborated for the user. The model statements, however, are not sufficiently founded. The author develops theoretical considerations in order to show how the model statements are determined by the experiment methodology.

Rudenko, O. G.: IA 2.5.; 2.6.

A Study of Adaptive Algorithms for Identifying Control Objects

msr 24 (1981) No. 11, pp. 633—636

The author presents two adaptation algorithms (single-step and multi-step algorithm) developed by him. Test calculations show convergence speed and identification time for single- and multi-variable systems with and without stochastic perturbations. The combination of a multi-step algorithm in the first phase with a single-step algorithm in the last phase of the identification process is proposed. A Robbin-Monro algorithm is compared with a two-step algorithm.

Janke, L.: IA 2.5.

Model Reference Adaption With Final Control Signal Restriction and Structural Differences Between Model and Object

msr 24 (1981) No. 11, pp. 637—640

The design of a model reference adaptive system by the direct method of Ljapunov presumes that object and reference model behavior are to be made identical by the adaptive input. By means of the example of a position control loop with final control signal restriction the author shows some measures in order to achieve approximately identical behavior also in the case of structural differences between reference model and object.

Woschni, E.-G.: IA 4.0.5.

System Behavior Correction by Computer — Increased Requirements for the Orginal Systems Quality

msr 24 (1981) No. 11, pp. 640—642

After survey on criteria for systems performance the author studies in more detail the limits resulting for different systems as examples as to the efficiency of correction programmes. Linear systems with preponderant statistical errors but dynamic reserve as well as systems with preponderant dynamic errors are considered. Nonlinearities and parameter sensitivity as well as the possibilities for the correction of frequency errors are taken into consideration. All cases show that the efficiency of the used computer programmes and thus the possible error reduction essentially depend upon the performance of the orginal sytems.

RÉSUMÉS

Peschel, M.; Mende, W.: IA 1.1.

Des problèmes de la modélisation mathématique de processus d'évolution

msr 24 (1981) No. 11, pp. 602—606

Contrairement au soi-disant accroissement exponentiel existant à peine dans la pratique, les auteurs proposent un modèle d'accroissement plus réaliste en connexion avec un principe pour le projet structurel des processus non linéaires et instationnaires qui toujours conduit à des structures dans la forme de systèmes bilinéaries. Des relations à l'hypercycle de M. Eigen et P. Schuster sont établies. Le développement en forme de chaîne avec l'intégrateur exponentiel comme module de base représente une alternative pour le développement usuel dans und série de Taylor.

Bendel, U.: IA 1.1.

Un modèle dynamique de ventricule de coeur sur la base du modèle d'un muscle courbé

msr 24 (1981) No. 11, pp. 617—622

L'auteur établit un modèle de ventricule de coeur sur la base d'un modèle de muscle. Sur tous les étages, les équations résultantes sont toujours deux équations différentielles couplées qui sont données en forme transformée de Laplace à cause de la linéarité supposée. Les fonctions de transfert qui représentent la structure des équations différentielles deviennent de plus en plus compliquées de l'étage à l'étage. Le modèle permet la solution de problèms pratiques.

Steinmüller, K.: IA 5.9.3.

Sur la commande de microbes nuisibles dans des systèmes agro-écologiques

msr 24 (1981) No. 11, pp. 623—626

A l'aide de deux propositions de modèle, l'auteur présente des considérations commande-théoriques pour la commande optimale de microbes nuisibles dans des systèmes agro-écologiques. Le modèle d'une population singulier de microbes nuisibles consiste dans des équations différentielles partielles pour l'abondance et l'âge physiologique, où l'influence de facteurs d'environs étant considéréé. La commande est une réduction continue de l'abondance. La fonctionelle d'objet est formulée. A l'aide du principe maximum de Pontrjagin, on peut obtenir une commande optimale. De plus, un système spoliateur de microbe nuisible est traité en utilisant un simple modèle population-dynamique.

Klett, E.: IA 1.1.6.0.

Des études pour la détermination de propositions de modèle mathématiques près l'analyse de régression

msr 24 (1981) No. 11, pp. 630—633

Dans les sciences techniques, l'analyse de régression est une méthode souvent appliquée à la représentation mathématique de données de mesure expérimentales. Les nécessareis outils mathématiques sont très bien élaborés, mais les propositions de modèle ne sont pas suffisamment fondées. L'auteur développe des considérations théoriques pour montre comment la forme des propositions de modèle est déterminée par la méthodologie d'expérience.

Rudenko, O. G.: IA 2.5.; 2.6.

Une étude d'algorithmes adaptifs pour l'identification d'objects de commande

msr 24 (1981) No. 11, pp. 633—636

L'auteur présente deux algorithmes adaptifs (algorithmes à pas singulier et à plusieurs pas) développés par lui. Les calculs de test montrent la vitesse de convergence et le temps d'identification pour des systèmes à une grandeur et à plusieurs grandeurs avec et sans perturbations stochastiques. Une combinaison d'un algorithme à plusieurs pas dans la première phase avec un algorithme à pas singulier dans la dernière phase du processus d'identification est proposée. Un algorithme de Robbin-Monro est comparé avec un algorithme à deux pas.

Janke, L.: IA 2.5.

L'adaption par modèle de référence avec restriction du signal de manoeuvre et différences structurelles entre l'objet et le modèle

msr 24 (1981) No. 11, pp. 637—640

Le projet d'un sysème adaptif à modèle de référence par la méthode directe de Ljapunov suppose que le comportement de l'objet peut être rendu identique à celui-là modèle de référence par l'entrée adaptive. A l'aide de l'exemple d'une boucle de réglage de position avec restriction de signal de manoeuvre, l'auteur montre quelques mesures pour rendre approximativement identique le comportement aussi en cas de différences structurelles entre le modèle de référence et l'objet.

Woschni, E.-G.: IA 4.0.5.

La correction du comportement de système par ordinateur — des exigences augmentées pour la qualité des orginaux

msr 24 (1981) No. 11, pp. 640—642

Après un aperçu sur les critères pour la performance de système, l'auteur étudie en détail les limites qui résultent pour differents systèms comme exemples quant à l'efficacité de programmes de correction. Des systèmes linéaires avec prépondérantes erreurs statistiques mais réserve dynamique ainsi que des systèmes avec prépondérantes erreurs dynamiques sont considérés. Des nonlinéarités, la sensibilité paramétrique et les possibilités pour la correction d'erreurs de fréquence sont mentionnées. Tous les cas montrent que l'efficacité des programmes de calcul appliqués et, avec cela, la possible réduction d'erreurs dépendent performance des systèmes originaux.

Bestellschein



Technik-Literatur

Die aufgeführten Bücher können Sie mit diesem Bestellschein im Inland beim örtlichen Buchhandel bestellen.

Expl.

Arbeitsbuch Automatisierungstechnik
Hoch- u. Fachschulliteratur
H. Töpfer; S. Rudert
2., bearbeitete Aufl., 164 Seiten,
123 Bilder,
Broschur 10,— M
Bestell-Nr. 5529688 ....

Handbuch Meßtechnik und Qualitätssicherung
D. Hofmann
2., stark bearbeitete Aufl., 472 Seiten,
235 Tafeln,
Leinen 43,50 M
Bestell-Nr. 5529581

Informationsübertragung
Wissensspeicher
Hoch- u. Fachschulliteratur
G. Fritzsche
2., bearbeitete Aufl., 416 Seiten,
zahlr. Bilder und Tafeln,
Leinen 25,— M
Bestell-Nr. 5527447 ....

Einführung in die Hydraulik und Pneumatik
Hoch- und Fachschulliteratur
D. Will; H. Ströhl
1. Aufl., 408 Seiten,
432 Bilder, 50 Tafeln,
Kunstleder 28,— M
Bestell-Nr. 5528191 ....

VEM-Handbuch Zuverlässigkeit von Automatisierungs- und Elektroenergieanlagen
VEM-Kollektiv
1. Aufl., 424 Seiten, 2 Beilagen,
200 Bilder, 77 Tafeln,
Kunstleder 32,— M
Bestell-Nr. 5529370 ....

Darüber hinaus können Sie alle in diesem Heft angezeigten und rezensierten Bücher des VEB Verlag Technik ebenfalls mit diesem Vordruck bestellen.

Expl.

....

....

....

....

Name, Vorname

....

Anschrift mit Postleitzahl

....

Datum Unterschrift

messen · steuern · regeln

Herausgeber	Kammer der Technik
Verlag	VEB Verlag Technik DDR-1020 Berlin, Oranienburger Str. 13/14 Telegrammadresse: Technikverlag Berlin Telefon: 28700; Telex: 0112228 techn dd
Verlagsleiter	Dipl.-Ök. *Herbert Sandig*
Redaktion	Dipl.-Ing. *Dieter Herrmann*, Verantwortlicher Redakteur (komm.), Telefon: 2870374; Dr.-Ing. *Dietrich Werner*, Redakteur, Telefon: 2870302
Lizenz-Nr.	1112 des Presseamtes beim Vorsitzenden des Ministerrates der Deutschen Demokratischen Republik
AN (EDV)	15936
Erscheinungsweise	monatlich 1 Heft
Heftpreis	4,— M, Abonnementpreis vierteljährlich 12,— M; Auslandspreise sind den Zeitschriftenkatalogen des Außenhandelsbetriebes BUCHEXPORT zu entnehmen.
Gesamtherstellung	VEB Druckerei „Thomas Müntzer“, 5820 Bad Langensalza
	Umschlag — eingetragene Schutzmarke des Warenzeichenverbandes Regelungstechnik e. V., Berlin
Anzeigenannahme	DDR-Anzeigen: DEWAG Berlin, 1026 Berlin, Rosenthaler Str. 28—31 (Telefon: 2703290), und alle DEWAG-Zweigstellen. Anzeigenpreisliste Nr. 6 Auslandsanzeigen: Interwerbung GmbH, DDR-1157 Berlin, Hermann-Duncker-Str. 89
Erfüllungsort und Gerichtsstand	Berlin-Mitte. Der Verlag behält sich alle Rechte an den von ihm veröffentlichten Aufsätzen und Abbildungen, auch das der Übersetzung in fremde Sprachen, vor. Auszüge, Referate und Besprechungen sind nur mit voller Quellenangabe zulässig.
Bezugsmöglichkeiten	
DDR	sämtliche Postämter; örtlicher Buchhandel; VEB Verlag Technik
UdSSR	Gebiets- und Städtische Abteilungen von Sojuzpečat' und Postämter
SVR Albanien	Spedicioni Shtypit te Jashtem, Tirane
VR Bulgarien	Direkzia R.E.P., 11a, Rue-Paris, Sofia
VR Polen	ARS POLONA, Krakowskie Przedmieście 7, 00-068 Warszawa
SR Rumänien	Directia Generala a Postei și Difuzarii Presei, Palatul Administrativ, București
ČSSR	PNS, Vinohradská 46, 12043 Praha 2 PNS, Gottwaldovo nám. 48, 88419 Bratislava
Ungarische VR	P.K.H.I., P.O.B. 16, 1426 Budapest
Republik Kuba	Instituto Cubano del Libro, Centro de Exposición Belascoain 864, La Habana
VR China	China National Publications Import Corporation, P.O. Box 88, Peking
SR Vietnam	XUNHASABA, 32, Hai Ba Trung, Hanoi
Koreanische VDR	CHULPANMUL Korea Publications Export & Import Corporation, Pyongyang
SFR Jugoslawien	Jugoslovenska Knjiga, Terazije 27, Beograd; Izdavačko Knjižarsko Produzeće MLADOST, Ilica 30, Zagreb
BRD und Westberlin	ESKABE · Kommissionsgrossobuchhandlung, Postfach 36, 8222 Ruhpolding Obb.; Helios Literatur-Vertriebs-GmbH. Eichborndamm 141—167, Berlin (West) 52; Kunst und Wissen Erich Bieber OHG, Postfach 46, 7000 Stuttgart 1; Gebrüder Petermann, BUCH + ZEITUNG INTERNATIONAL, Kurfürstenstr. 111, Berlin (West) 30, sowie weitere Grossisten und VEB Verlag Technik, DDR-1020 Berlin, Postfach 293
Österreich	Globus Buchvertrieb, Höchstädtplatz 3, A-1206 Wien
Schweiz	Genossenschaft Literaturvertrieb, Cramerstr. 2, CH-8004 Zürich
Alle anderen Länder	örtlicher Buchhandel; BUCHEXPORT Volkseigener Außenhandelsbetrieb der Deutschen Demokratischen Republik, DDR-7010 Leipzig, Postfach 160; VEB Verlag Technik, DDR-1020 Berlin, Postfach 293

Annahmebedingungen

Die Redaktion veröffentlicht nur solche Beiträge, die noch an keiner anderen Stelle des In- und Auslandes in dieser Form erschienen sind oder bis zur Veröffentlichung erscheinen werden und die die Verfasser bis zum Ablauf des ersten, dem Erscheinen folgenden vollen Kalenderjahres an keiner anderen Stelle veröffentlichen, ohne hierzu vorher die Zustimmung der Redaktion der Zeitschrift eingeholt zu haben. Mit der Annahme und Veröffentlichung des Manuskriptes geht das ausschließliche Verlagsrecht für alle Sprachen und Länder auf den Verlag über. Es ist ohne ausdrückliche Genehmigung der Redaktion nicht gestattet, fotografische Vervielfältigungen, Mikrofilme u. a. von Heften der Zeitschrift, einzelnen Beiträgen oder von Teilen daraus herzustellen. Ferner behält sich die Redaktion Änderungsvorschläge nach der Durcharbeitung der Beiträge vor. Beiträge müssen eine Kopie der Veröffentlichungsfreigabe des Betriebes bzw. des Institutes enthalten.

Richtlinien für die Manuskriptgestaltung sind dem Heft 1 (Beilage) messen · steuern · regeln 1981 zu entnehmen bzw. werden von der Redaktion auf Anfrage zugesandt. Die Einhaltung dieser Gesichtspunkte garantiert eine sofortige Bearbeitung und verzögerungsfreie Veröffentlichung der Arbeit in der Zeitschrift.

Hierbei handelt es sich um neue Titel aus der UdSSR, die dem sowjetischen Neuerscheinungsdienst „Novye knigi" entnommen sind. Die Bücher können über den Volksbuchhandel bestellt werden.

[1] *Šilo, V. L.:* Funkcional'nye analogovye integral'nye schemy (Funktionelle analoge integrierte Schaltungen). Radio i svjaz'. 3. Quart. 1982. NK-No. 3–81 (53).

[2] *Arajs, E. A.; Dmitriev, V. M.:* Modelirovanie neodnorodnych cepej i sistem na EVM (Modellierung inhomogener Ketten und Systeme auf der EDVA). Radio i svjaz'. 4. Quart. 1982. NK-No. 3–81 (55).

[3] *Balyberdin, V. A.:* Metody analiza mul'tiprogrammnych sistem (Methoden zur Analyse von Multiprogrammsystemen). Radio i svjaz'. 3. Quart. 1982. NK-No. 3–81 (57).

[4] *Vermišev, Ju. Ch.:* Metody avtomatičeskogo poiska rešenij pri proektirovanii složnych techničeskich sistem (Methoden zur automatischen Suche von Lösungen bei der Projektierung komplizierter technischer Systeme). Radio i svjaz'. 4. Quart. 1982. NK-No. 3–81 (59).

[5] *Viner, N.:* Kibernetika i obščestvo (Kybernetik und Gesellschaft. Übers. aus dem Engl.). Radio i svjaz'. 4. Quart. 1982. NK-No. 3–81 (60).

[6] *Gorelik, V. A.; Kononenko, A. F.:* Teorija igr i ekologo-ekonomičeskie sistemy (Spieltheorie und ökologisch-ökonomische Systeme). Radio i svjaz'. 4. Quart. 1982. NK-No. 3–81 (61).

[7] *Gorochov, V. G.:* Metodologičeskij analiz sistemotechniki (Methodologische Analyse der Systemtechnik). Radio i svjaz'. 3. Quart. 1982. NK-No. 3–81 (62).

[8] *Gchosal, A.:* Prikladnaja kibernetika ie e svjaz's issledovaniem operacij (Angewandte Kybernetik und ihre Verbindung zur Operationsforschung. Übers. aus dem Engl.) Radio i svgaz' 4. Quart. 1982. NK-No. 3–81 (63).

[9] *Džordž, F.:* Osnovy kibernetiki (Grundlagen der Kybernetik. Übers. aus dem Engl.). Radio i svjaz'. 4. Quart. 1982. NK-No. 3–81 (64).

[10] *Dimitriev, Ju. K.; Choroševskij, V. G.:* Vyčislitel'nye sistemy iz mini-EVM (Rechnersysteme aus Mini-EDVA). Kadio i svjaz'. 2. Quart. 1982. NK-No. 3–81 (65).

[11] *Kanter, Dž.:* Kurs avtomatizirovannych sistem upravlenija dlja upravlenčeskogo personala (Kurs der automatisierten Steuerungssysteme für Leitungspersonal. Übers aus. dem Engl.) Radio i svjaz'. 3. Quart. 1982. NK-No. 3–81 (67).

[12] *Magariu, N. A.:* Jazyk programmirovanija APL i ego primenenie (Programmiersprache APL und ihre Anwendung). Radio i svjaz'. 3. Quart. 1982. NK-No. 3–81 (68).

[13] *Pivovarov, A. N.:* Metody obespečenija dostovernosti informacii v ASU (Methoden zur Sicherung der Zuverlässigkeit der Information in ASU). Radio i svjaz'. 3. Quart. 1982. NK-No. 3–81 (73).

[14] *Raskin, L. G.; Kiričenko, I. O.:* Mnogoindeksnye zadači matematičeskogo programmirovanija (Aufgaben der mathematischen Optimierung mit mehreren Indizes). Radio i svjaz'. 2. Quart. 1982. NK-No. 3–81 (74).

[15] *Rozen, V. V.:* Cel'-optimal'nost'-rešenie (Ziel-Optimalität-Lösung). Radio i svjaz'. 2. Quart. 1982. NK-No. 3–81 (75).

[16] *Sevastjanov, Ju. S.; Fokin, V. M.; Machotenko, Ju. A.:* Naučnye, ekonomičeskie i organizacionnye osnovy upravlenija informacionnoj dejatel'nosti (Wissenschaftliche, ökonomische und organisatorische Grundlagen der Steuerung der Informationstätigkeit). Radio i svjaz'. 4. Quart. 1982. NK-No. 3–81 (76).

[17] *Sejdž, E. P.; Uajt, Č. U.:* Optimal'noe upravlenie sistemami (Optimale Steuerung von Systemen. Übers. aus dem Engl.) Radio i svjaz'. 2. Quart. 1982. NK-No. 3–81 (77).

[18] *Flejšman, B. S.:* Osnovy sistemologii (Grundlagen der Systemologie). Radio i svjaz'. 1. Quart. 1982. NK-No. 3–81 (78).

[19] *Cakani, A.:* Čto znaet karmannaja EVM (Was weiß der Taschenrechner. Übers. aus dem Ung.). Radio i svjaz'. 1. Quart. 1982. NK-No. 3–81 (79).

[20] *Sichaev, K. N.:* Raznostnye algorithmy parallel'nych vyčislitel'nych processov (Differenzen-Algorithmen für parallele Rechenprozesse). Radio i svjaz'. 3. Quart. 1982. NK-No. 3–81 (80).

[21] *Šrejder, Ju. A.; Šarov, A. A.:* Sistemy i modeli (Systeme und Modelle). Radio i svjaz'. 1. Quart. 1982. NK-No. 3–81 (81).

[22] *Judin, D. B.; Gorjaško, A. P.; Nemirovskij, A. S.:* Matematičeskie metody optimizacii ustrojstv i algoritmov ASU (Mathematische Methoden zur Optimierung von Anlagen und Algorithmen der ASU). Radio i svjaz'. 2. Quart. 1982. NK-No. 3–81 (82).

[23] Elektronnaja technika v avtomatike. Vyp. 13 (Elektronische Technik in der Automatik. Ausg. 13). Radio i svjaz'. 1. Quart. NK-No. 3–81 (89).

[24] *Sergeev, N. P.; Domnin, L. N.:* Algoritmizacija i programmirovanie (Algorithmierung und Programmierung). Radio i svjaz'. 4. Quart 1982. NK-No. 3–81 (119).

[25] *Rabinovič, Z. L.:* Osnovy teorii elementnych struktur EVM (Grundlagen der Theorie elementarer Strukturen von EDVA). Radio i svjaz'. 2. Quart. 1982. NK-No. 3–81 (132).

[26] Avtomatizacija sboročnych processov v mašinostroenii (Automatisierung der Montageprozesse im Maschinenbau). Nauka. 1970. NK-No. 3–81 (289M).

[27] *Krug, G. K.* u. a.: Planirovanie eksperimenta v zadačach identifikacii i ekstrapoljacii (Versuchsplanung in Aufgaben der Identifikation und Extrapolation). Nauka. 1977. NK-No. 3–81 (312M).

[28] *Vinogradov, V. I.:* Diskretnye informacionnye sistemy v naučnych issledovanijach (Diskrete Informationssysteme in wissenschaftlicher Forschung). Atomizdat. 4. Quart. 1981. NK-No. 4–81 (35).

[29] Upravljajuščie vyčislitel'nye mašiny v ASU technologičeskimi processami. T. 1. (Prozeßrechner in ASU technologischer Prozesse. Band 1. Übers. aus dem Engl.). Mir 1975. NK-No. 5–81 (253M).

[30] Band 2. Mir 1976. NK-No. 5–81 (254M).

[31] Zadači dinamičeskogo upravlenija (Aufgaben der dynamischen Steuerung). Izd-vo Ural'skogo nauč. centra ANSSSR. 4. Quart. 1981. NK-No. 6–81 (46).

[32] Klassifikacija i optimizacija v zadačach upravlenija (Klassifikation und Optimierung in Steuerungsaufgaben). Izd. vo Ural'skogo nauč. centra ANSSR. 4. Quart. 1981. NK-No. 6–81 (47).

[33] *Ovezov, B. B.:* Avtomatizacija upravlenija informacionnymi processami (Automatisierung der Steuerung von Informationsprozessen). Ylym (Turkm SSR). 4. Quart. 1981. NK-No. 7–81 (36).

[34] *Afifi, A.; Ejzen, S.:* Statističeskij analiz. Podchod c ispol'zovaniem EVM (Statistische Analyse. Herangehen mit Anwendung der EDVA). Übers. aus dem Engl.). Mir. 2. Quart. 1982. NK-No. 7–81 (55).

[35] *Bazara, M.; Šetti, K.:* Nelinejnoe programmirovanie. Teorija i algoritmy (Nichtlineare Optimierung. Theorie und Algorithmen. Übers. aus dem Engl.). Mir. 3. Quart. 1982. NK-No. 7–81 (56).

Isotimpex

Elektronisches Taxameter ELTAX 20



Das Taxameter errechnet den Fahrpreis, den gesamten vom Auto zurückgelegten Weg, den mit dem Fahrgast zurückgelegten Weg, die Anzahl der Fahrten (Touren) und die Summe der abgerechneten Fortschaltbeträge. Eltax 20 ist ein auf LSI-MOS-Schaltkreisen aufgebauter Taxi-Mikrocomputer. Der Fahrpreis wird durch ein 7-Segment-Display (Lichtemitterdioden) angezeigt. Die Kontrolldaten werden von elektromechanischen Zählern gespeichert. Eltax 20 arbeitet in 4 Tarifstufen. Grundtaxe, Tarife, Gebühren und Kenngrößen können in Abhängigkeit vom Autotyp leicht und schnell eingestellt werden.

Die Einstellung erfolgt durch Wechsel von Verbindungen im Kodefeld. Mit der Grundtaxe kann eine bestimmte Wegstrecke oder Wartezeit vorausbezahlt werden.

Eltax 20 ist mit dem Auto über einen Fotogeber verbunden. Der Geber hat ein geringes Gewicht und geringe Abmessungen. Er wird zwischen dem Tachometer und der Tachometerantriebswelle eingebaut.

Technische Daten:

- Arbeitsstellungen: „Frei", „Tarife" 1—4, „Klasse"
- Angezeigte Kenngrößen: Fahrpreis, Grundtaxe, Total-Kilometer, Besetzt-Kilometer, Anzahl der Fahrten, Summe der Fortschaltbeträge
- Anzeigen: 5stellige LED-Anzeige für den Fahrpreis und 1stellige LED-Anzeige für die Tarife
- Abmessungen: 175 × 165 × 96 mm³
- Masse: 1,6 kg
- Versorgungsspannung: 9 bis 15 V (Akkumulator des Autos)
- Leistungsaufnahme: 5 W bei 12 V
- Schutz gegen Funkstörungen

